

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИЯИ РАН)

УДК 539.1, 539.12, 539.14, 539.17

Рег. № 122041100017-9

Рег. №



М.В. Либанов

«28» декабря 2024 г.

**ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

122041100017-9

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, В  
ТОМ ЧИСЛЕ РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, НЕЙТРОННАЯ  
ФИЗИКА, ФИЗИКА И ТЕХНИКА ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ

(итоговый за 2024 год)

ФЦП

Руководитель НИР,  
Главный научный сотрудник,  
д.ф.-м.н.

Э.А. Коптелов  
«28» декабря 2024 г.

Москва 2024 г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,  
гл. науч. сотр.,  
д-р физ.-мат. наук



«29» декабря 2024 г  
подпись, дата

Э.А. Коптелов  
(введение, раздел 1, 3, 4, заключение)

Исполнители:  
Вед. науч. сотр.,  
д-р физ.-мат. наук



«29» декабря 2024 г

Р.М. Джилкибаев  
(раздел 2)

Вед. науч. сотр.,  
канд. физ.-мат. наук



«29» декабря 2024 г

Р.А. Садьков  
(раздел 3,4)

Вед. науч. сотр.,  
канд. физ.-мат. наук



«29» декабря 2024 г

С.Ф. Сидоркин  
(раздел 1,5,6)

Ст. науч. сотр.,  
канд. физ.-мат. наук



«29» декабря 2024 г

А.А. Семенов  
(общая редакция)

Нормоконтроль



«29» декабря 2024 г

О.Н. Либанова

## РЕФЕРАТ

Отчет 71 с., 1 кн., 38 рис., 3 табл., 56 источн., 1 прил.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ, МУЛЬТИФРАГМЕНТАЦИЯ, РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ, ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРОНОВ, ВКЛЮЧАЯ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ, ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ, НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТР, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ, МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИРОВАНИЕ, ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ, КАМЕРЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период, (2021 - 2030 годы), подпрограмма 2 "Фундаментальные и поисковые научные исследования". Область научных знаний:

1.3.2. Физика конденсированных сред и физическое материаловедение. 1.3.3. Ядерная физика и физика элементарных частиц.

Представленный отчет отражает основные результаты, полученные сотрудниками Института в 2024 году по теме «Физика конденсированных сред, материаловедение, в том числе радиационное материаловедение, нейтронная физика, физика и техника источников нейтронов».

Выполненные работы были направлены на развитие исследований на основе нейтронных источников ускорительного типа; совершенствованию методов исследования конденсированных сред при комплексном воздействии на материалы; развитию методов регистрации нейтронов и заряженных частиц, в том числе на источниках нейтронов ИЯИ РАН: с протонным драйвером, ИН-06, РАДЭКС, СВЗ-100. Использовалось математическое моделирование взаимодействия частиц с веществом, включая ядерные реакции и новые данные о нейтрон-ядерных взаимодействиях.

Новые результаты обосновывают расширение возможностей исследований структуры и физических свойств перспективных материалов для решения фундаментальных и прикладных задач на установках ИЯИ РАН, ОИЯИ.

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ .....	3
СОДЕРЖАНИЕ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. Развитие и применение транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций.....	13
1.1. Расчеты характеристик бериллиевой мишени для компактных импульсных источников нейтронов.....	13
1.2. Развитие динамических и статистических моделей образования и распада нуклонной и гиперъядерной материи .....	13
2. Исследования по физике деления и нейтрон-ядерных взаимодействий .....	15
2.1. Времяпролетный спектрометр установки ИНЕС .....	15
2.1.1. Система сбора и обработки данных установки .....	16
2.1.2. Измерение плотности потока нейтронов .....	16
2.1.3. Измерение зависимости фона от времени.....	17
3. Развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред.....	19
3.1. Разработка программного обеспечения для источника ИН-06 ИЯИ РАН.....	19
3.1.1. Программа для накопления данных на времяпролетном нейтронном спектре .....	19
3.1.2. Программа модуля микроконтроллера для управления и настройки преусилителей по интерфейсу SPI .....	21
3.2. Развитие технологии изготовления сцинтилляционных детекторов, включая создание ПЧД детектора на основе сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя .....	22
3.2.1. Исследование одномерного позиционно-чувствительного сцинтилляционного детектора.....	22
3.2.2. Метод получения позиционно чувствительных сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на сцинтилляторе ZnS(Ag)/LiF, световода из оргстекла и кремниевых фотоумножителей большой длины.....	24
3.3. Развитие аппаратуры измерений и приборного оборудования для нейтронных и комплементарных исследований конденсированных сред.....	26

3.4. Создание системы измерения давления в камерах, предназначенных для исследований нейтронными методами под высокими давлениями, основанной на фотолюминесценции рубина .....	27
3.5. Модернизация установки МНС на источнике ИН-06 .....	29
4. Исследование структуры перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях) .....	32
4.1. Исследование структуры немагнитных жаропрочных сплавов .....	32
4.2. Фазовые превращения в материалах, возникающие при изменении межионных расстояний под воздействием сверхвысоких давлений .....	32
4.3. Структурные и фононные аномалии в сверхпроводящем $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ с различным уровнем легирования при высоких давлениях .....	33
4.4. Решёточный эффект на сверхобменное взаимодействие в антиферромагнитном $\text{Bi}_{2.1}\text{Sr}_{1.9}\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ .....	34
4.5. Программа для проведения измерений высокого сопротивления при криогенных температурах .....	35
4.6. Программы для изготовления и подготовки элементов для камеры высокого давления с алмазной наковальней .....	36
4.7. Моделирование протяженных дефектов в графене для объяснения его термодинамических свойств .....	37
4.8. Рентгеновские исследования термостойких волокон на основе карбида кремния, модифицированных атомами тугоплавких металлов .....	38
5. Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, с целью улучшения и оптимизации параметров установок .....	40
5.1. Использование спектров нейтронных реакций, полученных методом СВЗ для получения более достоверных сведений о характеристиках атомных ядер .....	40
5.1.1. Преодоление недостатка метода СВЗ (слабое энергетическое разрешение) путём использования Ф.О. спектрометра и компьютерных технологий. Метод итераций для решения некорректных задач .....	40
5.1.2. Решение задачи восстановления спектров .....	40
5.1.3. Использование функции отклика спектрометра СВЗ-100 для получения "истинных" спектров .....	42
5.2. Совершенствование приборной базы и мишеней нейтронного комплекса с целью повышения информативности по контролируемым параметрам и безопасности за счет установки современных приборов контроля и наблюдения .....	44

5.3. Радиационное материаловедение .....	47
6. Развитие новых методов исследований фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов .....	50
6.1. Исследование низколежащих р-волновых нейтронных резонансов .....	50
6.1.1. Создание прототипа установки для исследования р-волновых нейтронных резонансов.....	50
6.1.2. Определение зависимости потока нейтронов от энергии нейтронов. ....	52
6.1.3. Разработка методики измерения и обработки времяпролетных и амплитудных спектров гамма квантов в р-волновых резонансах .....	54
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	56
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	61
ПРИЛОЖЕНИЕ А Список публикаций исполнителей отчета за 2024 г. ....	67

## ВВЕДЕНИЕ

### **1. Задача «Развитие и применение транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций».**

Продолжение работ по совершенствованию программного комплекса SHIELD и его использованию для моделирования нейтронных процессов на нейтронном комплексе ИЯИ РАН и при разработке долгоживущей нейтронной мишени компактного импульсного источника нейтронов. В работе использованы методы компьютерного моделирования на основе программных комплексов MCNPX, SHIELD и тепловые расчеты.

Проект направлен также на развитие динамических и статистических моделей образования и распада нуклонной и гиперядерной материи, на изучение процессов образования и распада возбужденной гиперядерной и нормальной ядерной материи в столкновениях тяжелых ионов.

Цель работы – Создание комплекса программ на основе ранее развитой в ИЯИ РАН модели SMM (статистическая модель мультифрагментации) для расчета процесса нуклеосинтеза и образования ядерных фрагментов в реакциях, инициированных лептонами, адронами, и ядрами средних и высоких энергий. Анализ соответствующих экспериментальных данных. Включение программ в комплекс SHIELD для расчетов по распространению ядерных частиц в сложных материалах.

### **2. Задача «Исследования по физике деления и нейтрон-ядерных взаимодействий».**

Цель работы заключается в модернизации элементов установки ИНЕС, разработке и изготовлении электроники, предназначенной для работы с различными детекторами в условиях высокого уровня электрических помех. В качестве детекторов рассматриваются кристаллы NaI, CsI, лавинные фотодиоды (APD), фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и нейтронные газовые  $^3\text{He}$  счетчики.

Модернизация элементов установки ИНЕС [1, 2] по измерению полных и парциальных  $(n,\gamma)$  нейтронных сечений в области ядерных реакторов и ядерной астрофизики позволит повысить точность измерений параметров известных резонансов, провести измерение спорных резонансов и обнаружить новые резонансы. Установка ИНЕС использует времяпролетную (TOF) методику для измерения сечений и состоит из сцинтилляционного  $\gamma$ -детектора (8 секций), мониторных (4 счетчика) и пучковых (4 счетчика) нейтронных  $^3\text{He}$  счетчиков.

В 2024 г. проводились работы по созданию пакета программ для реконструкции сечений радиационного захвата нейтронов ядром, а также модернизация системы сбора и

обработки данных. Измерен энергетический спектр импульсного источника нейтронов РАДЭКС, и проведено сравнение с результатами моделирования. Разработан черенковский монитор протонного пучка. Описана процедура определения формы импульса нейтронов от времени на базе измеренной формы импульса протонного пучка, с учетом замедления нейтронов в мишени. Проведено измерение спектра нейтронов на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС центра коллективного пользования (ЦКП) ИЯИ РАН с образцом золота  $^{197}\text{Au}$ . Разработана процедура определения зависимости фона от времени.

### **3. Задача «Развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред».**

Проект направлен на развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06, позволяющее расширить спектр исследований, возможных на источнике ИН-06 ИЯИ РАН, и создающее прикладную базу для исследований, имеющих потенциальное применение в материаловедении, энергетике, обработке материалов и других отраслях индустрии.

Существующие исследовательские центры для проведения экспериментов на выведенных пучках тепловых нейтронов являются сложными системами. ИН-06 является источником нейтронов испарительного типа. Для правильной работы требуется синхронная работа как ускорителя, так и исследовательской установки, в частности детекторной системы. Оптимизация и автоматизация эксперимента позволят повысить качество проведения эксперимента и сократить время необходимое на одно измерение.

Представлено развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред новыми твердотельными сцинтилляционными детекторами тепловых нейтронов и экспериментальных исследований свойств веществ при высоких давлениях.

Исследования линейных детекторов позволили на их основе создать новый дифрактометр по времени пролета, состоящий из набора коаксиальных колец. Важно при этом, что увеличение охвата телесного угла регистрации рассеянных образцом нейтронов позволяет, при средней мощности потока падающего излучения, иметь достаточную статистику для уверенной обработки полученных нейтронограмм с целью определения фазовых переходов, фазового состава и координат ионов - межионных расстояний - в элементарной ячейке поликристаллических веществ. Необходимым условием является выбор оптимального соотношения разрешение-интенсивность всех брэгговских пиков, что определяется размерами линейных детекторов. Возможность выбора размеров и создание многодетекторных схем различных конфигураций детекторов позволяют получить хорошую статистику при средней мощности импульсного источника нейтронов. Наличие

импульсного источника дает преимущество из-за отсутствия монохроматора, необходимого для установок на реакторах, и позволяет создавать осесимметричные кольца регистрации рассеянных нейтронов. Эти детекторы нами рассмотрены и изготовлены. Их характеристики приведены в публикациях отчета. Все результаты НИР с рисунками и таблицами представлены в публикациях исполнителей в Приложении А.

#### **4. Задача «Исследование структуры перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях)».**

Изучение природы электронных и фазовых переходов при высоком давлении имеет фундаментальную ценность как метод плавного изменения межионных расстояний и углов химсвязей в кристалле, что даёт возможность тонкой подстройки структуры к оптимальным или рекордным значениям параметров. Применение же техники высоких давлений для изучения геофизики и особенностей внутреннего строения и динамики Земли и других планет представляется просто очевидным и единственно возможным экспериментальным методом.

Были проведены исследования кристаллической структуры, электронных и магнитных свойств веществ в экстремальных условиях, исследование фазовых переходов и построение фазовых диаграмм совместно с ИК РАН (г. Москва), HPSTAR (г. Шанхай, Китай). Синтезированы и изучены свойства новых высокотемпературных сверхпроводников в экстремальных условиях высоких давлений совместно с ИК РАН (г. Москва), HPSTAR (г. Шанхай, Китай). Были изучены важные минералы для физики Земли, сильно-коррелированных электронных систем и мультиферроиков в экстремальных условиях высоких давлений и криогенных температур совместно с ИК РАН (г. Москва), HPSTAR (г. Шанхай, Китай).

Создан и развивается комплекс экспериментальных установок для проведения исследований в экстремальных условиях высоких давлений, низких температур и сильных магнитных полей. Также создан и развивается кластер технологических установок для приготовления экспериментальных сборок при высоком давлении для дальнейшего проведения экспериментов на синхротронных и нейтронных установках коллективного пользования (синхротроны 3-го и 4-го поколений и мощные нейтронные источники для твердотельных исследований).

Методом порошковой нейтронографии изучен кристаллографический фазовый состав жаропрочных сплавов на основе молибдена (Mo) с добавками титана (Ti) и углерода. Проведены измерения нейтронограмм с использованием камер высокого давления типа поршень-цилиндр и наковальни и определено влияние давления на

магнитную простую спираль шпинели  $^{114}\text{Cd}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Cr}_2\text{Se}_4$ . Получено, что происходит сжатие спирали под давлением.

Ведется работа по созданию системы контроля давлений по спектрам фотолюминесценции рубина в камерах поршень-цилиндр для нейтронографических экспериментов. Изготовлено устройство для измерения давлений в камерах высокого давления и криостатах с оптоволоконном. Оснащение установки МНС двухкоординатным детектором для дифракции, в том числе малоугловой, разработка методов анализа данных.

Наличие протяженных дефектов в графене может объяснить превышение величины теплоемкости графита при высоких температурах вблизи температуры плавления над классической величиной  $3R$  (закон Дюлонга-Пти).

Разработка высокопрочной и устойчивой к высоким температурам керамики и композитных материалов необходима для космической и авиационной промышленности. Совместно с институтом ГНИИХТЭОС (г. Москва) проводились исследования структуры и фазового состава образцов волокон, содержащих атомы тугоплавких металлов, полученных на основе Ta (Zr) металлокарбосиланов.

**5. Задача «Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, с целью улучшения и оптимизации параметров установок».**

Объектами исследования являются аппаратурные спектры нейтронных реакций, полученные методом спектрометрии по времени замедления нейтронов в свинце (СВЗ).

Целью работы является разработка методики улучшения энергетического разрешения заявленных спектров для различных типов нейтронных реакций.

В работе использован метод компьютерного моделирования функции отклика (Ф.О.) нейтронного спектрометра СВЗ-100 в гауссовом приближении и метод итераций в качестве регуляризирующего алгоритма для восстановления аппаратурных спектров.

Определена функция (Ф.О.) отклика спектрометра с учётом нейтронного потока в экспериментальных каналах установки, детектированного нейтронным счётчиком на основе лития. С использованием Ф.О. проведена обработка аппаратурных спектров путём решения обратной задачи и получены результаты с энергетическим разрешением значительно лучшим, чем позволяла методика спектрометрии по времени замедления.

Установлено, что энергетическое разрешение восстановленных спектров зависит от погрешности аппаратурного спектра, то есть, от набранной статистики. Чем больше зарегистрировано событий, тем лучше разрешение по энергии.

Предложенный способ восстановления спектров позволяет преодолеть недостаток спектрометрии по времени замедления нейтронов в свинце - низкое временное и

энергетическое разрешение - при сохранении преимуществ метода СВЗ - высокая светосила и чувствительность. Исследование редких процессов во взаимодействии нейтронов с веществом и изучение веществ в крайне малом количестве (например, короткоживущих изотопов) может проводиться с лучшей точностью.

Один из модулей программного комплекса можно использовать для проектирования экспериментов на спектрометрах по времени замедления (СВЗ) и спектрометрах по времени пролёта (ВП) нейтронов, получая вычисленные аппаратурные спектры, исходя из предполагаемых "истинных" значений.

Рассмотрены вопросы совершенствования импульсных источников нейтронов на основе сильноточных протонных ускорителей. Целью является разработка долгоживущей бериллиевой мишени для компактных импульсных источников нейтронов и ее окружения (расположения замедлителей и отражателей), совершенствование работы систем контроля и диагностики импульсных источников нейтронов ИН-06 и РАДЭКС.

В результате продолжения исследований (с помощью программ MSNPX и SHIELD) более точно определены основные геометрические размеры мишени и нейтронного источника в целом, в том числе замедлителей, отражателей и их расположение, тепловые параметры и ожидаемые плотности потоков тепловых нейтронов.

Для нейтронного комплекса ИЯИ РАН выбраны места размещения кондуктометров и рН метров и условия встраивания их общую систему диагностики.

Предложенные решения позволяют создать долгоживущую бериллиевую мишень и компактный импульсный источник тепловых нейтронов с низким фоном промежуточных и быстрых нейтронов, а также гамма-квантов.

Обновленная система кондуктометров позволяет контролировать скорость коррозии в первом радиоактивном контуре нейтронного комплекса, прогнозировать, и предотвращать внештатные ситуации.

Область применения результатов – разработка головного образца компактных импульсных источников нейтронов для будущих компактных импульсных источников. Усилена система контроля и визуализация процессов на первом радиоактивном контуре охлаждения нейтронного комплекса ИЯИ РАН.

Продолжена работа по исследованию кинетики радиационного повреждения металлов в условиях нейтронного облучения. Разрабатывается эффективная методика расчета концентрации вакансионных пор в металлах при каскадном облучении на больших дозах, прогнозируемых в термоядерных реакторах, с учетом пространственных вариаций температуры и характеристик микроструктуры повреждений.

## 6. Задача «Развитие новых методов исследований фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов».

Нейтронные резонансы характеризуют состояния компаунд-ядра и для изучения этих состояний требуется знание параметров резонанса, полной и парциальных ширин, спина и четности состояния, а также статистические свойства этих состояний (распределение расстояний между резонансами, распределение ширин).

Исследование Р-четных корреляций дает возможность определить парциальные нейтронные ширины р-волнового резонанса, знание которых позволяет точно рассчитать матричный элемент слабого нейтрон-ядерного взаимодействия. Исследование энергетической зависимости асимметрии вылета гамма квантов вперед-назад может быть применено для поиска нарушения Т-инвариантности.

Строго говоря, для определения параметров потенциала взаимодействия необходимо выполнить множество опытов с поляризованными нейтронами и анализом поляризации продуктов реакции и провести фазовый анализ. Однако, для идентификации р-волнового резонанса достаточно выполнить измерения углового распределения продуктов реакции.

Сечение реакции ( $n, \gamma$ ) в области р-волнового резонанса имеет вид:

$$\sigma(k_\gamma \cdot k_n) = A_0 + A_1 \cdot (k_\gamma \cdot k_n) + A_2 \cdot ((k_\gamma \cdot k_n)^2 - 1/3). \quad (1)$$

Здесь  $k_\gamma$  и  $k_n$  единичные векторы направления импульсов гамма кванта и нейтрона,  $A_0 = u_s^2 + u_p^2$ ,  $A_1 = (-2x + 2^{0.5}y) \operatorname{Re}(u_s u_p^*)$ ,  $A_2 = -(2^{-0.5} + y^2/4)u_p^2$ . Параметры  $x$  и  $y$  имеют вид  $x = (\Gamma_{p1/2}/(\Gamma_{p1/2} + \Gamma_{p3/2}))^{0.5}$ ,  $y = (\Gamma_{p3/2}/(\Gamma_{p1/2} + \Gamma_{p3/2}))^{0.5}$ . Если угловая зависимость сечения ( $n, \gamma$ ) – реакции может быть описана зависимостью (1), то это р-волновой резонанс.

Работы по определению парциальных нейтронных ширин были начаты в ЛНФ ОИЯИ в 1985 году и остановлены в 1990 году [3], связи с закрытием реактора ИБР-30. В последнее время появился ряд работ японских ученых [4, 5, 6] по исследованию р-волновых резонансов на ядрах La,  $^{81}\text{Br}$  и  $^{117}\text{Sn}$ , но только в одной последней работе [7] сообщается об определении  $\Gamma_{p1/2}$ .

# **1. Развитие и применение транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций**

## **1.1. Расчеты характеристик бериллиевой мишени для компактных импульсных источников нейтронов**

Задача создания новых источников нейтронов в настоящее время более чем актуальна в связи с их явным недостатком для проведения исследований в области физики конденсированного состояния и создания новых материалов.

Для создания компактных импульсных источников нейтронов на основе сильнооточного протонного пучка с энергией частиц  $\sim 13$  МэВ используются материалы с низкой энергией связи нейтрона в ядре ( $\text{Be}^9$ ,  $\text{Li}^7$ ) – преимущественно бериллий, который быстро разрушается из-за накопления водорода в материале (блистринг) [8, 9]. Для преодоления этих трудностей проведена оценка модели мишени с использованием расчетного модуля SHIELD. Предложена и обоснована тонкая вращающаяся бериллиевая мишень с горизонтальной осью вращения с водным охлаждением при низком давлении воды. Проведено расчетно-техническое обоснование модели мишени. Расчеты нейтронных потоков проводились с помощью программных комплексов MCNPX, SHIELD [10], которые достаточно хорошо коррелируют друг с другом и использовались ранее при обоснованиях установок нейтронного комплекса ИЯИ РАН [11]. Оценки работоспособности конструкции были подтверждены также тепловыми и гидродинамическими расчетами.

## **1.2. Развитие динамических и статистических моделей образования и распада нуклонной и гиперъядерной материи**

Продолжена работа, направленная на развитие моделей образования (динамическая стадия) и распада (статистическое описание) возбужденной гиперъядерной и нормальной ядерной материи. Исследуются процессы испарения, Ферми-развала, деления и мультифрагментации с обобщением на гиперядра.

Предложена модель для описания образования легких ядер и гиперядер в центральных столкновениях тяжелых ионов ядер высокой энергии. Модель включает в себя расчет начального взаимодействия адронов с помощью динамических подходов вычислительного комплекса Ultra-relativistic Quantum Molecular Dynamics (UrQMD) и Dubna Cascade Model (DCM), и впервые предлагает рассматривать образование фрагментов и гиперфрагментов как результат локального взаимодействия барионов в переходной области ядерного фазового перехода в расширяющейся ядерной материи.

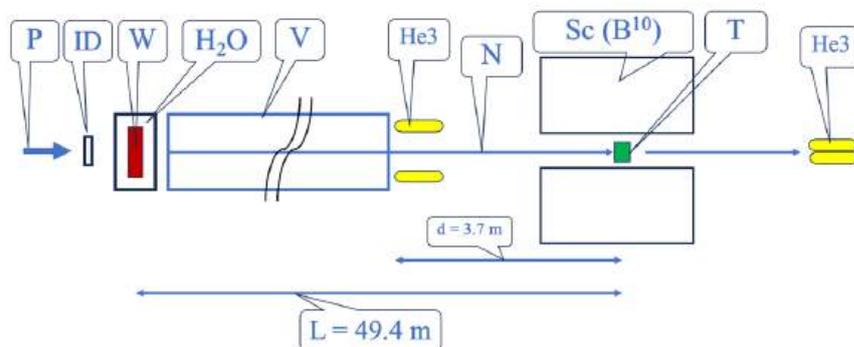
Расчет сделан с помощью модифицированной SMM модели. Впервые получено удовлетворительное описание STAR экспериментальных данных в Au+Au столкновениях при энергии 3 AGeV [12, 13]. Это развитие позволит также объяснить будущие эксперименты на ускорителях NICA в ОИЯИ (Дубна), что будет выполнено в рамках участия в MPD коллаборации [14]. Продолжено совершенствование статистического подхода для описания нуклеосинтеза в конечных ядерных системах.

Проводится работа по развитию и улучшению имеющегося SMM кода для девозбуждения ядер, включающего в себя испарение, деление, мультифрагментацию, Ферми-развал. Улучшения проверяются и передаются для практических расчетов, и могут быть использованы в сложных вычислительных кодах типа SHIELD.

## 2. Исследования по физике деления и нейтрон-ядерных взаимодействий

### 2.1. Времяпролетный спектрометр установки ИНЕС

Установка ИНЕС (см. рисунок 2.1) использует времяпролетную (TOF) методику и состоит из мониторинговых  $\text{He}^3$  счетчиков нейтронов [1], восьми секций сцинтилляционных детекторов  $\gamma$ -квантов [2], монитора протонного пучка и системы регистрации и обработки данных. Импульсный источник нейтронов РАДЭКС использует вольфрамовую мишень с водяным охлаждением для образования нейтронов импульсным протонным пучком. Протонный пучок имеет энергию 267 МэВ, импульсный ток 5-7 мА, длительность 0,3 мкс с частотой импульсов 50 Гц. Энергия нейтронов определяется по времени пролета, измеряемое многоканальным TDC кодировщиком с непрерывной записью сигналов от  $\gamma$ -детектора каждые 100 нсек в течении 19,66 мсек, который запускается синхроимпульсом протонного пучка. Время пролета нейтрона  $T$  [мкс] определяется пролетной базой установки  $L$  [м] и энергией нейтрона  $E$  [эВ], следующим образом  $T = 72,3 L \cdot E^{-1/2}$ . Пролетная база установки  $L$  определяется расстоянием от мишени (W) источника до измеряемого образца (Т) и равна 49,4 м. Относительная погрешность в измерении энергии нейтрона зависит от временной неопределенности  $\delta T$  и равна  $\delta E/E = 2,77 E^{1/2} \delta T/L$  (%) [2]. Основной вклад во временную неопределенность  $\delta T$  вносит длительность протонного пучка равная  $\sim 0,3$  мкс. Можно оценить время пролета и относительную ошибку в измерении энергии для нейтрона с энергией 100 эВ, которые равны 357 мкс и 0,17%, соответственно.



База установки измеряется от вольфрамовой (W) нейтронной мишени источника до измеряемого образца (Т) и составляет величину равную 49,4 м. Протонный пучок (P) взаимодействует с водо-охлаждаемой мишенью (W). Две группы нейтронных  $\text{He}^3$  счетчиков расположены до и после сцинтилляционного гамма-детектора (Sc). Индукционный датчик тока (ID) измеряет форму импульса протонного пучка.

Вакуумированный канал (V) длиной 44 м

Рисунок 2.1 – Схематическое изображение времяпролетного спектрометра установки ИНЕС на нейтронном канале (N) источника РАДЭКС

### 2.1.1. Система сбора и обработки данных установки

Система состоит из электроники детекторов (усилители и формирователи сигналов, 16-канальный временной кодировщик (TDC) с USB интерфейсом) и C++ программы по обработке и сжатию цифровой информации. Цифровые сигналы с гамма-детектора (8 каналов) и  $^3\text{He}$  счетчиков (8 каналов) поступают на 16-канальный временной кодировщик (TDC) с возможностью обработки цифровой информации (2 байта) с частотой 10 МГц (каждые 100 нсек) со скоростью 20 МВ/сек. Предварительная обработка и сжатие информации позволяет сократить объем данных для записи на диск в 650 раз. Типовой набор данных с установки за время 7 часов составляет  $\sim 800$  МВ. Аналоговые сигналы обрабатываются выборочно 16-канальным АЦП CAEN DT5742 (waveform digitizer). Текущий счет детекторов установки и графики работы детекторов за предыдущие сутки выводится на website установки <http://ines.inr.ru:1880/ui>.

### 2.1.2. Измерение плотности потока нейтронов

Плотность потока нейтронов  $\Phi(E)$  моделировалась с помощью программы MCNP [15]. Мишень состоит из 80% W и 20%  $\text{H}_2\text{O}$ . При моделировании предполагалось, что протонный пучок с энергией 300 МэВ попадает в центр мишени, состоящей из тонких вольфрамовых пластин с общей толщиной 8 см и поперечным размером 13x13 см. Рассчитанный поток нейтронов  $\Phi^{\text{th}}(E)$ , вылетающих из мишени вперед, относительно протонного пучка, в зависимости от энергии нейтронов показан на рисунке 2.2 а. Аппроксимация нейтронного потока в области от 1 до  $10^5$  эВ зависимостью  $\Phi(E) = C/E^\alpha$  дает следующие значение для  $\alpha = 0,9$ . Измерение потока нейтронов проводилось с помощью мониторинговых нейтронных счетчиков. Эти счетчики установлены перед сцинтилляционным гамма-детектором в пучке нейтронов вне зоны образца. На рисунке 2.2 б показан спектр потока нейтронов от энергии, измеренный мониторинговыми  $\text{He3}$  счетчиками. На измеренном спектре хорошо виден провал от выбывания нейтронов в W мишени от радиационного захвата нейтрона ядром изотопа W180, резонанс с энергией 19 эВ. Два других провала обусловлены примесью следующих изотопов в элементах мишенного узла источника РАДЭКС и нейтронного вакуумного канала: кобальта  $^{59}\text{Co}$ , имеющего резонанс с энергией 132 эВ, марганца  $^{55}\text{Mn}$ , имеющего резонанс с энергией 341 эВ. Измеренный поток нейтронов аппроксимируется зависимостью  $\Phi(E) = Cg(E)/E^\alpha$ , где фактор  $g(E) = \exp(-\sum n_i \sigma_i^i(E))$  обусловлен выбыванием нейтронов элементами нейтронного канала. При этом параметры C и эффективная  $n_i$  плотность i-го изотопа определяются в результате процедуры аппроксимации измеренного потока нейтронов  $\Phi^{\text{exp}}(E)$ .

Измеренный поток нейтронов  $\Phi^{\text{exp}}(E)$  и результаты аппроксимации потока

зависимостью  $Cg(E)/E^\alpha$  показаны на рисунке 2.2 б. При этом, показатель зависимости от энергии нейтрона составляет величину равную  $\alpha = 0,895 \pm 0,005$  в области энергии 5 - 500 эВ. Это хорошо согласуется с показателем  $\alpha = 0,9$  для смоделированного потока нейтронов.

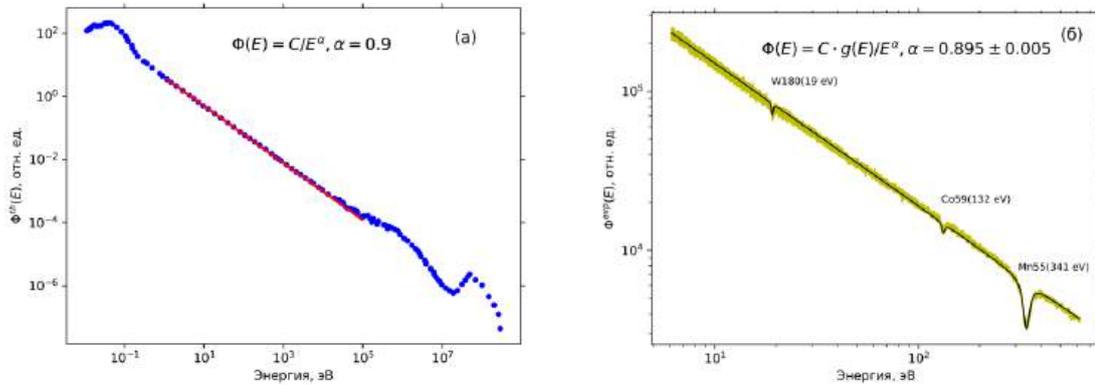


Рисунок 2.2 – (а) – рассчитанный поток нейтронов  $\Phi^{th}(E)$ , аппроксимация потока зависимостью  $C/E^\alpha$  показана сплошной линией в области 1-10<sup>5</sup> эВ. (б) – измеренный поток нейтронов  $\Phi^{exp}(E)$ ; аппроксимация потока зависимостью  $\Phi(E)$  показана сплошной линией в области 5 - 500 эВ

### 2.1.3. Измерение зависимости фона от времени

Для определения зависимости фона от времени используется измеренный спектр  $C_{bg}(t)$  без образца и спектр  $C_{Au}(t)$  с образцом золота. Экспериментально измеренную вероятность радиационного захвата нейтрона ядром образца Au, можно выразить следующим образом [16]:

$$Y_{exp}(t) = (C_{Au}(t) - B(t)) / (\epsilon \cdot f \cdot \Phi(t)), \quad (2)$$

где  $C_{Au}(t)$  – экспериментально измеренный времяпролетный спектр радиационного захвата нейтрона ядром образца,  $t$  – время пролета нейтрона,  $B(t)$  – спектр фона, полученный на основе измерений без образца и аппроксимации спектра  $C_{Au}(t)$  между резонансами,  $\Phi(t)$  – поток нейтронов в районе образца,  $\epsilon$  – эффективность детектора гамма-квантов,  $f$  – часть нейтронного потока, попадающая в образец. Измеренный спектр фона  $C_{bg}(t)$  аппроксимируется следующей зависимостью от времени:

$$B(t) = C_1/t^\alpha + C_2/t^\beta, \quad (3)$$

где  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  параметры зависимости  $B(t)$ . На рисунке 2.3 а показаны измеренные спектры  $C_{Au}(t)$  с образцом золота и  $C_{bg}(t)$  без образца. Следует отметить, что статистика при измерении фона  $C_{bg}(t)$  в несколько раз меньше, чем спектра  $C_{Au}(t)$ . В наших измерениях постоянный фон, не зависящий от времени, значительно меньше фона, зависящего от времени.

Процедура определения параметров фона  $B(t)$  состоит из двух этапов: на первом этапе определяются предварительные параметры фона  $B(t)$  путем аппроксимации измеренного спектра без образца; на втором этапе процедуры используются предварительные параметры фона для финальной аппроксимации параметров фона  $B(t)$  для спектра  $C_{Au}(t)$  с отобранными участками спектра между резонансами (см. рисунок 2.3 а). Измеренный спектр, за вычетом фона, равен  $C_{Au}^{exp}(t) = C_{Au}(t) - B(t)$  и представлен на рисунке 2.3 б.

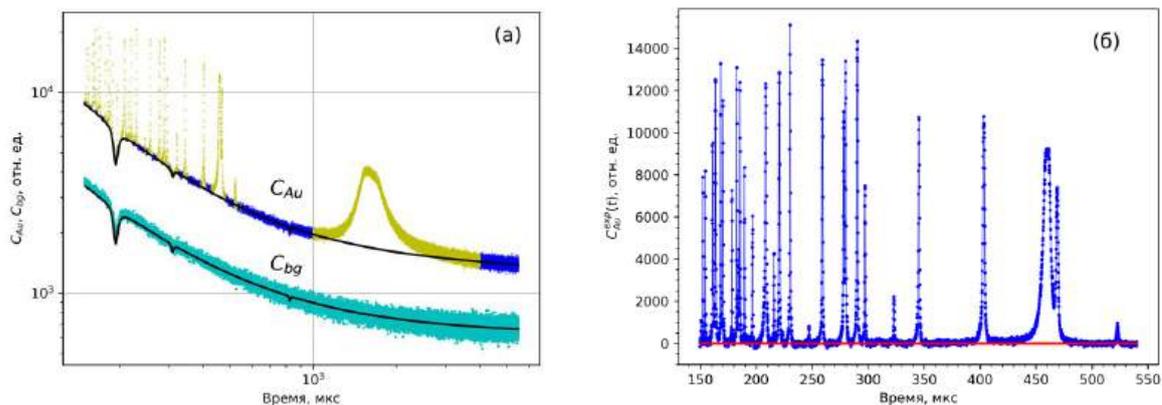


Рисунок 2.3 – (а) – измеренные спектры  $C_{bg}(t)$  без образца и  $C_{Au}(t)$  с образцом  $^{197}\text{Au}$ ; аппроксимации фона зависимостью  $B(t)$  для двух для спектров  $C_{bg}(t)$  и  $C_{Au}(t)$  показаны сплошными линиями. (б) – измеренный спектр  $C_{Au}^{exp}(t)$  за вычетом фона в области времени пролета нейтрона 150 – 550

### **3. Развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред**

#### **3.1. Разработка программного обеспечения для источника ИН-06 ИЯИ РАН**

Одной из целей данного проекта является автоматизация проведения эксперимента и повышения качества полученных данных при нейтронных экспериментах на времяпролетном нейтронном пучке.

Целью данной работы является:

- разработка программ для накопления данных на времяпролетном нейтронном спектре;
- разработка программы модуля микроконтроллера для управления и настройки предусилителей по интерфейсу SPI.

##### **3.1.1. Программа для накопления данных на времяпролетном нейтронном спектре**

Разработанная программа [17] используется в новых время-цифровых преобразователях (ВЦП или TDC), используемых для накопления данных. Основные параметры программы:

- количество входных каналов не менее 16;
- формат входных каналов счетчиков (TTL 5v и NIM);
- программная установка задержки синхроимпульса;
- программная установка ширины канала;
- ширина канала от 0,01 мкс до 12,5 мкс;
- количество временных каналов 4096;
- установка задержки синхроимпульса в пределах 0,01 мкс до 256 мкс;
- вывод питания +6 В DC - 3А для питания сцинтилляционных счетчиков;
- управляющая программа на Windows.

Программа устанавливается на разработанную электронику Time-to-digital converter (TDC). Решаемая TDC задача – определение временного интервала между событиями. В качестве события выступает срабатывание какого-либо детектора.

Основное применение многоканальных систем TDC – это различные детекторы высоких энергий и частиц там, где требуется высокоточные измерения временного интервала (от пикосекунд). За счет такой высокой точности цена на эти модули держится на высоком уровне.

В отличие от всех этих применений, типичная ширина канала при дифракционных измерениях на времяпролетном спектре всего 0,5 – 8 мкс. Также типичное время интегрирования предусилителя детектора составляет 1 мкс. В связи с этим нет необходимости в пикосекундной точности измерения, что упрощает требования к проектированию подобных систем.

Возможным вариантом создания подобной системы – это TDC на основе ПЛИС (FPGA). Программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) – электронный компонент (интегральная микросхема) – используется для создания конфигурируемых цифровых электронных схем. В отличие от обычных цифровых микросхем, логика работы ПЛИС не определяется при изготовлении, а задаётся посредством программирования (проектирования). Из-за того, что требуется ширина канала около 0,5 – 8 мкс, возможно при проектировании пренебречь внутренними задержками на кристалле и значительно упростить разработку модуля.

В качестве тестовой ПЛИС использована макетная плата Arty A7-35T. Xilinx Artix-7 FPGA имеет встроенный генератор до 450MHz и АЦП, программируется через JTAG и Quad-SPI Flash, имеет 256MB DDR3L с 16-битной шиной 667MHz. По параметрам данная плата подходит для создания TDC. Встроенной высокоскоростной памяти BRAM достаточно на организации работы 16 счетчиков по 4096 каналов с разрядностью 16 bit ( $16 \cdot 4096 \cdot 16 = 1\,048\,576$  bit или  $\approx 1,048$  Кбит).

В качестве самого простого интерфейса для организации связи с ПК возможно использовать USB-UART на чипе FTDI. Теоретическая максимальная скорость работы 2,4 мегабита/сек, что позволит достаточно быстро передавать данные на ПК и максимально снизить простой при передаче данных.

На рисунке 3.1 показана блок-схема работы разработанного программного обеспечения

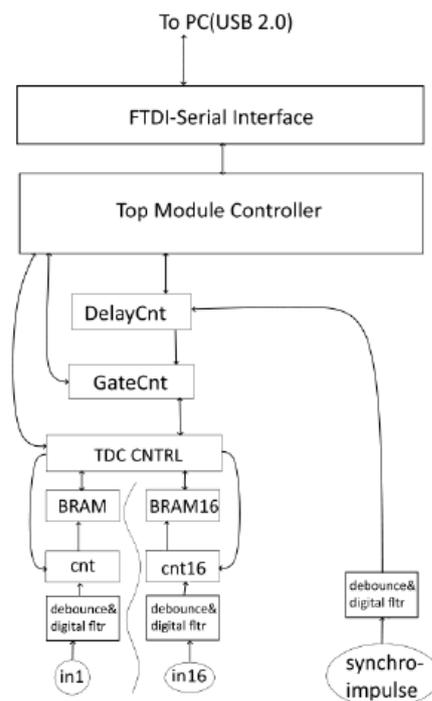


Рисунок 3.1 – Блок-схема программы

Логика работы: по приходу синхроимпульса сигнал обрабатывается цифровыми фильтрами и поступает на модуль задержки. В модуле задержки происходит задержка сигнала на величину, установленную в регистре задержки. После задержанного сигнала синхроимпульса происходит запуск генератора ворот, который выдает 4096 импульсов для суммирования и сброса данных счетчиков с интервалом, равным регистру ширины канала. По сигналу «запись» происходит суммирование текущего показания счетчика с данными в BRAM. После каждого входного сигнала стоит модуль цифровой обработки для фильтрации помех. 16 счетчиков и 16 ячеек BRAM объединены одним модулем верхнего уровня, который отвечает за запись и чтение памяти, распределения сигналов с генератора ворот и обработки сигнала READ: (запуск счета). Top Module Controller отвечает за обработку команд по UART интерфейсу (чтение, запись, сигнал READY), установку регистров задержки и ширины канала. Также он отвечает за измерение частоты входного сигнала синхроимпульса. Модуль UART работает на частоте 921600 бод, parity - нет, data bit - 8 bit, stop bit - 1 bit.

### 3.1.2. Программа модуля микроконтроллера для управления и настройки предусилителей по интерфейсу SPI

Разработанная программа [18] реализует алгоритм управления и настройки порогов предусилителей нейтронных детекторов. Программа используется в разработанном устройстве управления пороговыми, основанном на микроконтроллере Atmega 2560. Данная программа обеспечивает выполнение следующих функций: связь с ПК по интерфейсу

CAN, управление уровнями порогов по интерфейсу SPI, поддержка 2х каналов SPI, возможность изменения CAN ID, сохранение параметров порогов и CAN ID в EPPROM, удаленное переназначение портов. Возможно подключение до 50 предусилителей. В таблице 1 приведены команды для управления микроконтроллером.

Таблица 1 – Команды управлением порогом

Команда	Сообщение							
	0xID	0x01	0xNewID	0xID	0x00	0x00	0x00	0x00
Смена ID	0xID	0x01	0xNewID	0xID	0x00	0x00	0x00	0x00
Запись порога (single)	0xID	0x02	0xVAL	0xNum	0x00	0x00	0x00	0x00
Запись порока (all)	0xID	0x03	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
Чтение памяти	0xID	0x04	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
Запись порога в память	0xID	0x05	0xVAL	0xNum	0x00	0x00	0x00	0x00
Тест выхода	0xID	0x06	0xVAL	0xPin	0x00	0x00	0x00	0x00
Смена Выхода	0xID	0x07	0xInt	0xreal	0x00	0x00	0x00	0x00
версия ПО	0xID	0x08	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
Активация выходов(real)	0xID	0x09	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00
Активация выходов (Virtual)	0xID	0x10	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00

### **3.2. Развитие технологии изготовления сцинтилляционных детекторов, включая создание ПЧД детектора на основе сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя**

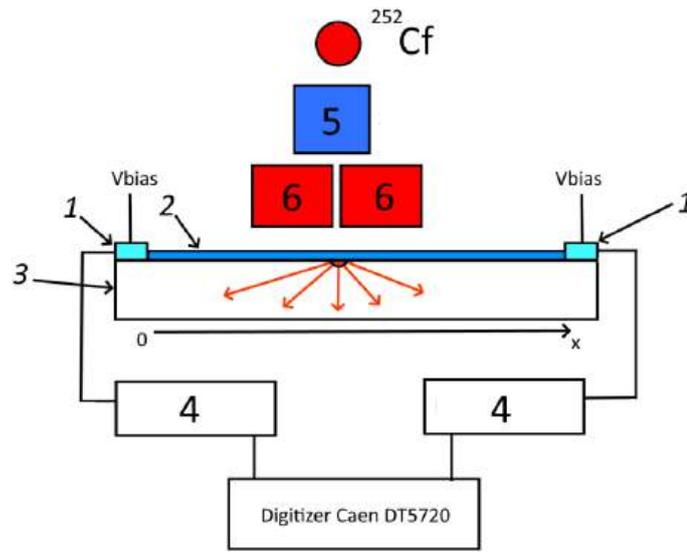
Направление работ данного проекта – исследование возможности создания дешевых позиционно-чувствительных сцинтилляционных детекторов (ПЧД), а также исследование их параметров. Разработанные детекторы будут обладать низкой ценой и могут использоваться в существующих исследовательских нейтронных центрах.

Целью данной работы является исследование параметров одномерного ПЧД детектора.

#### **3.2.1. Исследование одномерного позиционно-чувствительного сцинтилляционного детектора**

В рамках работы проведены исследования разработанных ранее сцинтилляционных одномерных позиционно-чувствительных детекторов. В качестве установки для тестирования была собрана схема, изображенная на рисунке 3.2. В качестве источника нейтронов использовался  $^{252}\text{Cf}$ , после которого расположен замедлитель нейтронов толщиной 100 мм. Детектор расположен на линейной подвижке с ходом 100 мм, которая перемещает детектор вдоль пучка. После замедлителя расположена комбинированная защита толщиной 5 см, состоящая из слоев кадмия и слоев свинца со щелью размером

2мм х 20мм. Общая толщина кадмия около 2см, свинца 3см. Расстояние источник нейтронов – детектор 30 см. Детектор расположен на расстоянии около 3 мм от щели. Дополнительно для защиты от рассеянного излучения детектор и система перемещения были закрыты со всех сторон свинцовыми кирпичами толщиной 30 мм, перед которыми расположены листы кадмия толщиной 2 мм. Сигналы, полученные с SiPM, попадают на предусилитель-дискриминатор, сигналы с которого анализируются и сохраняются диджитайзером Caen DT5720.



1 -SiPM, 2 – сцинтиллятор, 3- световод, 4 – предусилитель, 5 – замедлитель D<sub>2</sub>O, 6 – комбинированная щель из свинца и кадмия

Рисунок 3.2 – Блок схема установки для тестирования:

В первую очередь было проведено измерение детектора с диффузионным отражателем, количество измерений на точку 5000. Результаты измерения показаны на рисунке 3.3.

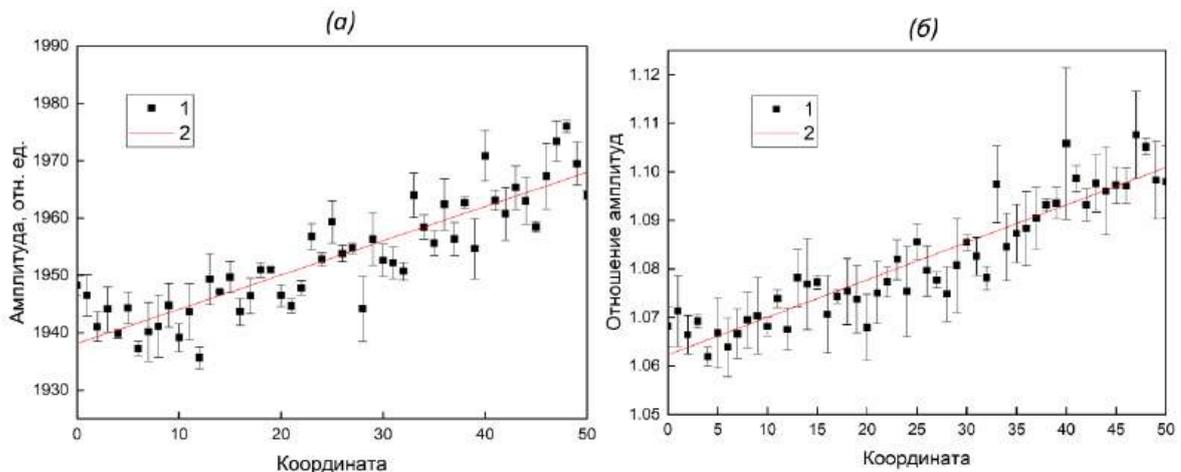


Рисунок 3.3 – (а) – средняя амплитуда с правого SiPM. (б) – отношение амплитуд: 1 – экспериментальные данные, 2- аппроксимация

Как видно из результатов измерений, форма затухания фотонов в световоде имеет линейный характер, и отслеживается зависимость амплитуды от координаты, которая описывается линейной функцией. В общем виде, затухание фотонов в объёме световода описывается Законом Бугера - Ламберта - Бера, который описывается формулой

$$I=I_0e^{-kl}, I = I_0e^{-kl}, \quad (4)$$

где  $I$  – интенсивность света, прошедшего слой вещества толщиной  $l$ ,  $I_0$  – интенсивность света на входе в вещество,  $k$  – показатель поглощения.

Как видно из формулы, затухание света в веществе происходит по экспоненциальному закону и не учитывает отражения от стенок световода. Линейная форма зависимости, полученной из экспериментальных данных, позволяет судить, что на данной длине световода затухание не сильно выражено. Это позволяет предположить, что возможно увеличить длину детектора. Разрешение по координате в данном образце детектора примерно 10 мм.

Далее были проведены измерения детектора без диффузионного отражателя. Результаты измерения показаны на рисунке 3.4. Из результатов измерения видно, что детектор имеет большее затухание, и форма приближается к экспоненциальной, однако имеет линейный характер на начальной части (рисунок 3.4 а, б). За счет большего затухания данный детектор имеет большее разрешение (примерно 5 мм).

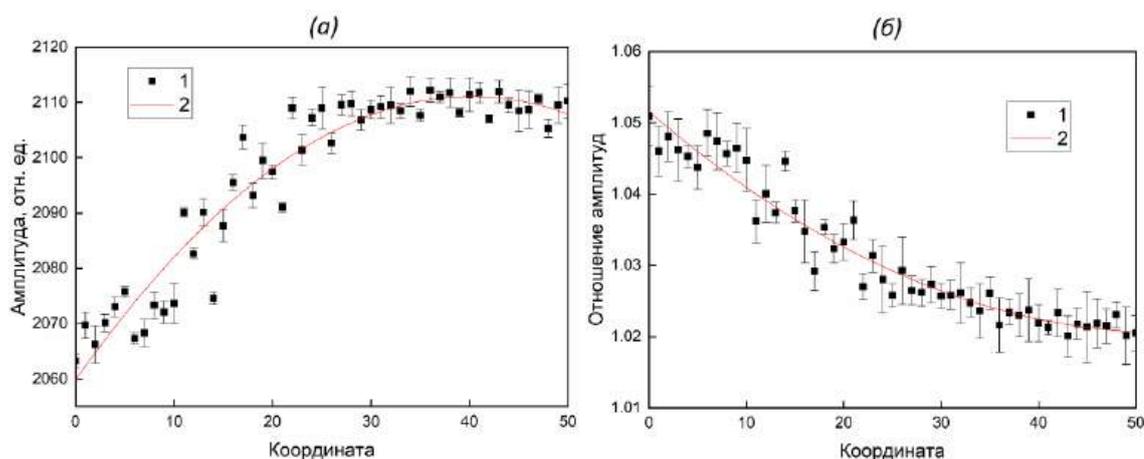
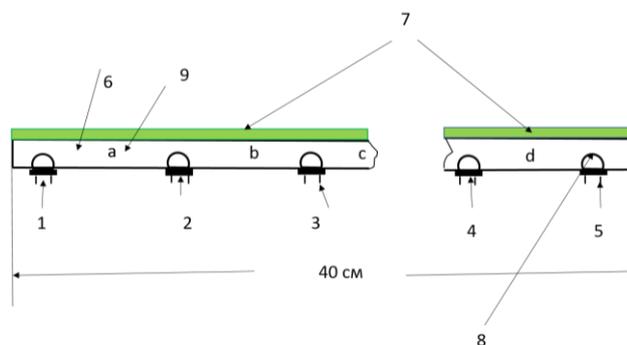


Рисунок 3.4 – (а) – средняя амплитуда с правого SiPM, (б) - отношение амплитуд:  
1 – экспериментальные данные, 2- аппроксимация

### 3.2.2. Метод получения позиционно чувствительных сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на сцинтилляторе ZnS(Ag)/LiF, световода из оргстекла и кремниевых фотоумножителей большой длины.

Настоящий проект направлен на исследование способа увеличения длины позиционно чувствительного счетчика (рисунок 3.5) тепловых нейтронов при сохранении разрешающей способности. Решение этой задачи позволит делать двух-координатные

детекторы большого размера. Позиционное положение счетчика дает (X) координату, а положение вспышки от нейтрона на счетчике дает (Y) координату. По сравнению с проволочными камерами такого же размера счетчик более технологичен в исполнении.

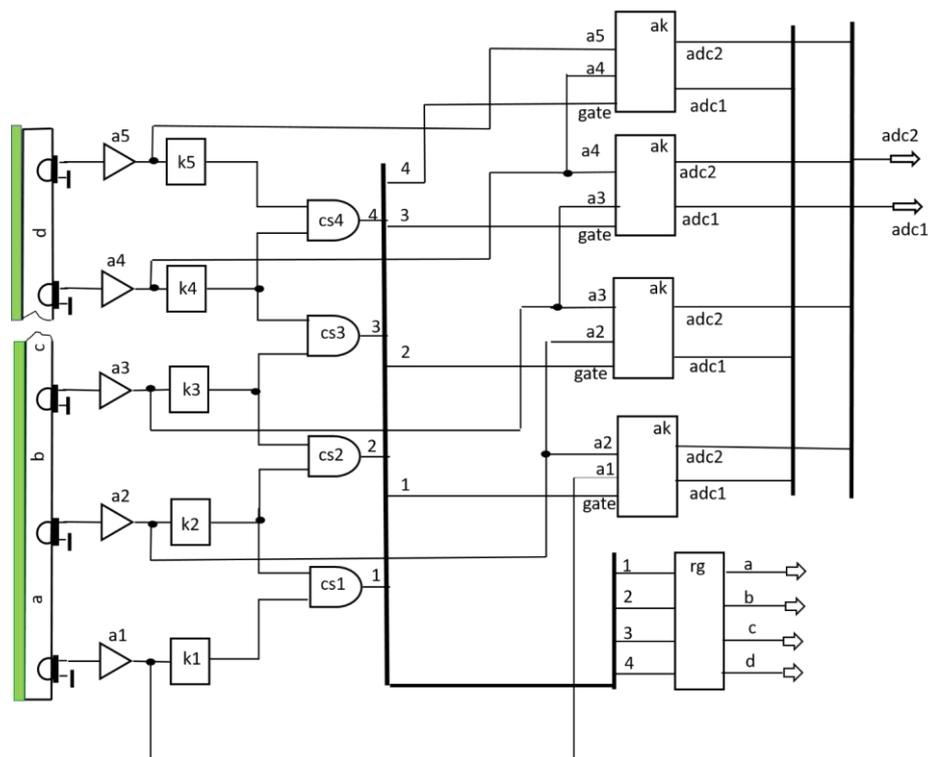


1, 2, 3, 4, 5 – кремниевые фотоумножители, 6 – световод, 7 – сцинтиллятор ZnS(Ag)LiF толщиной 0.45мм и эффективностью поглощения 42%, 8 – линза «рыбий глаз», имплементированная в световод, 9а, b, с, d – секторы световода

Рисунок 3.5 – Конструкция длинного позиционно чувствительного счетчика тепловых нейтронов

На световод длиной 40 см с одной стороны наклеен сцинтиллятор ZnS(Ag)LiF, с другой стороны приклеены кремниевые фотоумножители. Они приклеены на имплементированные в световод линзы «рыбий глаз». Расстояние между кремниевыми фотоумножителями выбрано 10 см. Таким образом они образуют секторы в световоде (а, b, с, d), что эквивалентно четырем десятисантиметровым позиционно чувствительным счетчикам. Вся конструкция заключена в черную термоусадочную трубку. Сигналы с кремниевых фотоумножителей поступают на токовые усилители. С усилителей на схемы совпадения и через аналоговые ключи на АЦП.

Допустим нейтрон попал в сектор «а». Сигналы с кремниевых фотоумножителей «1» и «2» через усилители поступают на схему совпадения и записываются в позиционный регистр. Это означает, что сработал сектор «а». Сигнал совпадения открывает аналоговые ключи, и сигналы с кремниевых фотоумножителей «1» и «2» поступают на АЦП 1 и АЦП2. Контроллер обработки сигналов воспринимает данные с позиционного регистра и выходные данные с АЦП1 и АЦП2 и обрабатывает данные сектора «а». Определяет координату взаимодействия нейтрона в секторе «а» и, соответственно, координату относительно всего счетчика. Обработка координаты ведется методом деления заряда. Структурная схема электроники предварительной обработки сигналов от позиционно чувствительного счетчика представлена на рисунке 3.6.



(a1 - a5) – токовые усилители, (k1 - k5) – аналоговые компараторы, (cs1 - cs4) – схемы совпадения, ak – аналоговые ключи, rg – выходной регистр

Рисунок 3.6 – Структурная схема предварительной обработки сигналов от позиционно чувствительного счетчика

После взаимодействия нейтрона с сцинтилятором счетчика вспышка света от сцинтиллятора попала между соседними кремниевыми фотоумножителями. Интенсивность света распределилась между ними обратно пропорционально расстоянию от каждого. Сигналы от них через усилители поступают на аналоговые компараторы (k) и на аналоговые ключи одновременно. Сигнал со схемы совпадения (cs) от соседних каналов кремниевых фотоумножителей поступает в регистр. Одновременно он является управляющим для аналогового ключа (ak). Ключ открывается и аналоговые сигналы от усилителей соседних каналов (a) поступают на ADC1 и ADC2. Контроллер обработки получает данные с ADC1 и ADC2 и регистра (Rg). По данным регистра определяет сектор счетчика, а по данным ADC1 и ADC2 координату взаимодействия нейтрона внутри сектора и соответственно координату в целом счетчике. Разрешение длинного детектора сохраняется, как и у 10 сантиметрового 5 мм.

### 3.3. Развитие аппаратуры измерений и приборного оборудования для нейтронных и комплементарных исследований конденсированных сред

Созданы и испытаны линейные двухкоординатные (ПЧД) сцинтилляционные детекторы и дифрактометр тепловых нейтронов СФЕРА.

Основной задачей разработки сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов являлось создание детектора, по размеру и эффективности аналогичного гелиевым счетчикам “СНМ-16” и “СНМ-17”, без использования спектросмещающих волокон и фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) [19].

Создан линейный ПЧД с простой электроникой. Разработанная схема усилителя-формирователя с динамической схемой смещения позволяет увеличить нагрузочную способность сцинтилляционных счетчиков нейтронов с твердотельными фотоумножителями в 8 раз до 400 кГц. Данную схему можно применить в любых детекторах, использующих кремниевые фотоумножители [20].

Нейтроннографическая аппаратура для внешнего воздействия на образец (магниты, криостаты, камеры высокого давления) требует объемов образцов порядка 1 см<sup>3</sup>. Соответственно, возникают свои требования к устройствам для создания условий на образце.

В ИЯИ РАН для нейтроннографических установок имеются криостаты замкнутого цикла, позволяющие достигать температур 4К и 10К при мощности 0,5 Вт при любой ориентации образца относительно пучка и, благодаря внутреннему диаметру до 70 мм, позволяющие проводить измерения с камерами системы поршень-цилиндр при давлениях до 1ГПа. Также имеется устройство с дистанционной вариацией на основе постоянных магнитов, позволяющее менять величину магнитного поля и достигать полей от 0,1Тл до 1,2 Тл изменением расстояния между наконечниками-полюсами. Данное устройство удобно для измерений МУРН при высоких давлениях в криостатах шахтного типа с узким «хвостом». Перечисленная аппаратура воздействия на образец важна для исследования фазовых переходов, в том числе исследования типа магнитной структуры и сверхпроводников [21].

Проведены работы по математическому моделированию сцинтилляционных многослойных детекторов и дифрактометра в установках Нейтронного комплекса ИЯИ с целью улучшения параметров установок. Это позволило выбрать оптимальную геометрию многодетекторного дифрактометра тепловых нейтронов СФЕРА для импульсного источника ИН06 ИЯИ РАН [22]. Проведена работа по разработке проектов и оптимизации (с использованием Монте-Карло моделирования) [23].

#### **3.4. Создание системы измерения давления в камерах, предназначенных для исследований нейтронными методами под высокими давлениями, основанной на фотолюминесценции рубина**

Для измерения давлений, прикладываемых к образцу, в нейтроннографических экспериментах применяется в основном кристаллический NaCl (изменение параметров

решетки и, следовательно, – сдвиг брэгговских пиков). Недостатком данного метода является наложение брэгговских пиков от NaCl на спектр образца, а также возможные реакции NaCl с образцом или средой [24]. В качестве манометра применяется и манганиновая проволока. Ограничения этого метода связаны с невозможностью работы в электропроводящих и агрессивных средах, вероятностью закорачивания, особенно в вязких средах [25]. Для измерения давлений в наковальнях широко используется метод, основанный на сдвиге пиков фотолюминесценции рубина в зависимости от приложенного давления. Однако, соответствующие приборы [26] не подходят для измерения давлений в камерах типа поршень-цилиндр, а также неприменимы для измерений in-situ на нейтронном пучке. В связи с этим, были разработаны системы для измерения давления в камерах поршень-цилиндр [24, 27]. В данных системах оптоволокну заведено в камеру [24], либо подходит вплотную к камере с алмазным окном [27]. Благодаря оптоволокну, спектрометр и лазер можно располагать вдалеке от нейтронного пучка, а измерения проводить in-situ, например, в криостатах.

Для измерения давления в камерах поршень-цилиндр in situ, в т. ч. в нейтронографических экспериментах, была разработана система измерения на основе эффекта зависимости положения линий фотолюминесценции рубина от давления. Особенность системы состоит в наличии 10-м оптоволокну, которое позволяет вывести ее из домика, где расположен образец. Схема системы приведена на рисунке 3.7, а на рисунке 3.8 – полученный на рубине спектр фотолюминесценции при нормальных условиях. Для измерений используются линии 6942 и 6928 Å, а положение этих линий зависит от давления. Результаты представлены в докладе [21].

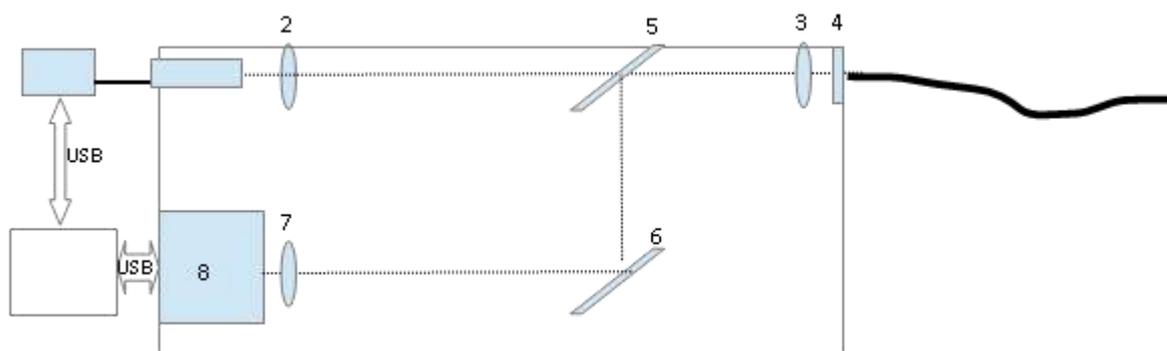


Рисунок 3.7 – Схема устройства: лазер (1), рассеивающая (2) и фокусирующая линзы (3), держатель оптоволокну (4), дихроическое зеркало (5), отклоняющее зеркало (6), фокусирующая линза (7), монохроматор (8)

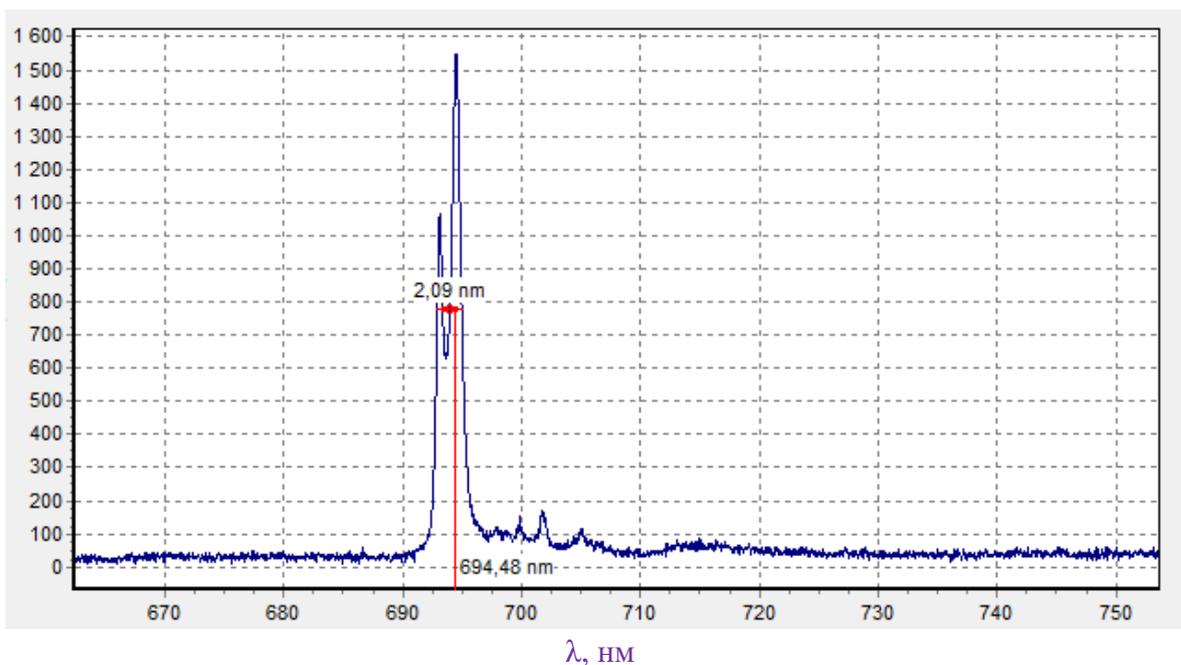


Рисунок 3.8 – Спектр рубина, измеренный с помощью прибора в нормальных условиях

### 3.5. Модернизация установки МНС на источнике ИН-06

Продолжена работа по модернизации установки МНС на источнике ИН-06. Идея установки МНС заключается в одновременном исследовании структуры вещества методом нейтронной дифракции в широком диапазоне – от атомного до нанометрового, что дает возможность исследовать *in situ* процессы синтеза, кристаллизации и т. п. В настоящее время установка оснащена детектором высокого разрешения с временной фокусировкой для углов рассеяния  $2\Theta = 156 - 165^\circ$ . Также проектом установки предусмотрена опция малоугловой дифракции, для которой и был изготовлен двухкоординатный детектор нейтронов. Поскольку источник нейтронов импульсный, измерения проводятся по времяпролетной методике. Хотя с помощью каждого детектора дифрактограмма может быть получена при любом угле  $2\Theta$ , каждый детектор оптимален для своего диапазона межплоскостных расстояний.

Дифракционные измерения в рамках данной работы проводились с помощью ПЧД (рисунок 3.9), который был установлен на расстоянии 720 мм от образца на углы рассеяния  $2\Theta = 44-64^\circ$ . С помощью данного ПЧД были получены профили прямого пучка. Во время измерений источник работал на малых токах, и интенсивность нейтронного пучка на образце не превышала  $10^3 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Путем интегрирования двумерного профиля по вертикали и по времени пролета полностью и при энергиях нейтрона ниже 0,5 эВ получены горизонтальные профили пучка (рисунок 3.10). Виден эффект от поглощения тепловых нейтронов ( $E_n < 0,5 \text{ эВ}$ ) кадмиевой маски (синее поле на двумерной картине) и от образца – зеленое поле и провал в центре пика. Из рисунка хорошо видно, что

нейтронный пучок проходит через образец сплава MoTiC диаметром 12 мм. Это наглядно демонстрирует возможность исследования массивных образцов. В частности, возможность проведения радиографических и томографических исследований деталей машин, объектов культурного наследия и т.п., в диапазоне энергий нейтронов от 0,25 МэВ до 0,5 МэВ.

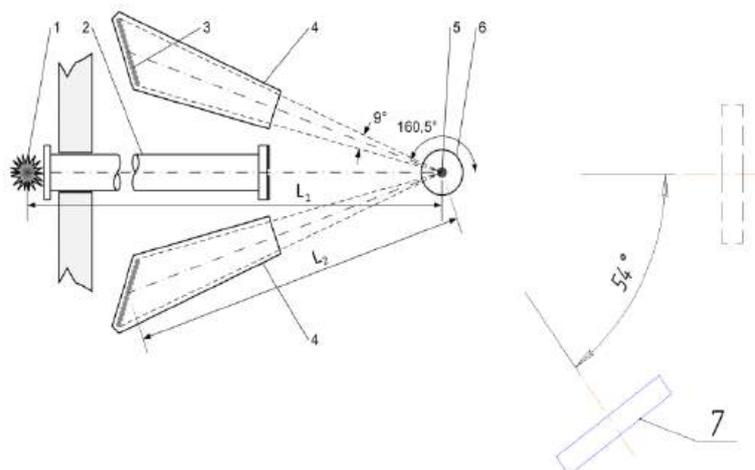
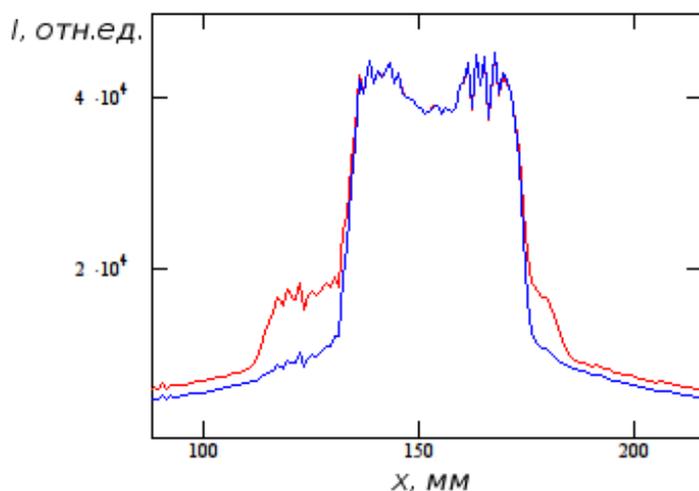


Рисунок 3.9 – схема установки МНС: 1 – замедлитель, 2 – нейтроновод, 3 – детектор высокого разрешения с временной фокусировкой, 4 – вакуумный кожух детектора, 5 – образец, 6 – стол образца, 7 – ПЧД

(а).



(б).

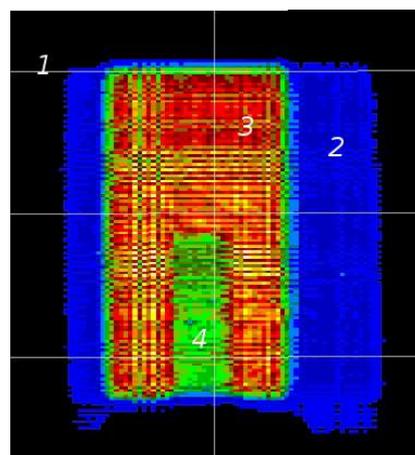


Рисунок 3.10 – Профиль прямого пучка нейтронов. (а) – Горизонтальный: синий – только тепловые нейтроны, красный – все нейтроны. (б) – Двумерный профиль пучка: 1 – фон, 2 – выходная апертура нейтроновода, 3 – окно в кадмиевой маске, 4 – тень образца

В качестве образца для дифракционных измерений был выбран сплав MoTiC с твердостью 57 НРС, ранее его структура исследовалась на рентгеновском дифрактометре

StadyMP и на нейтронном дифрактометре «Геркулес» на том же импульсном источнике ИН-06 в ИЯИ РАН [28]. Для получения времяпролетных спектров массив данных делился на 20 областей интегрирования – вертикальных полос шириной от 5 до 20 точек, в каждой из которых суммировались все точки, соответствующие одному времени пролета. Для интегрирования данных ПЧД была разработана программа на языке Python. Дифракционные спектры, полученные с помощью ПЧД, при различных толщинах областей интегрирования, представлены на рисунке 3.11. Как видно из рисунка, более узким областям интегрирования соответствуют более узкие пики и низкий фон, но меньшая интенсивность. Результаты опубликованы в [29] и представлены в докладе [30].

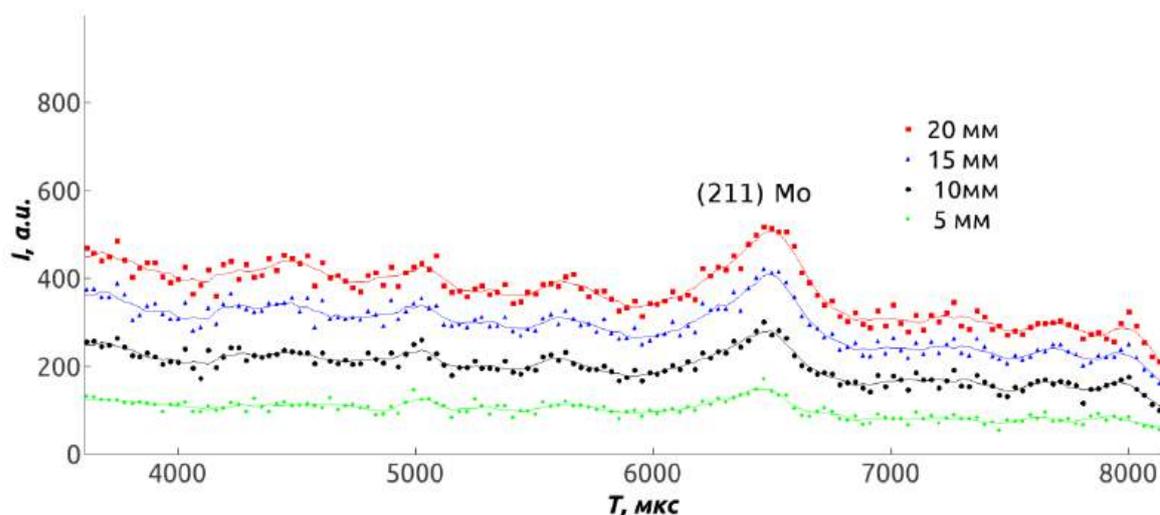


Рисунок 3.11 – Нейтронные дифрактограммы, полученные с помощью ПЧД, при ширине областей интегрирования 5, 10, 15 и 20 мм. Отчетливо виден пик (211) ОЦК Мо

## **4. Исследование структуры перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях)**

Проведены исследования кристаллической структуры, электронных и магнитных свойств веществ в экстремальных условиях, исследование фазовых переходов

### **4.1. Исследование структуры немагнитных жаропрочных сплавов**

Методом малоуглового рассеяния тепловых нейтронов (МУРН) на установке «Горизонт» ИЯИ РАН исследована структура немагнитных жаропрочных сплавов на основе Ni и Ti. Данные сплавы представляют интерес как материал для изготовления нейтронографических устройств для исследований в магнитных полях, в том числе нейтронными методами [21, 30, 31]. Измерение спектров МУРН на образцах сплавов необходимо и для выбора оптимального материала для изготовления камер высокого давления.

Проведены исследования магнитной структуры с малопоглощающим тепловые нейтроны изотопом ( $^{114}\text{Cd}$ ) шпинели  $^{114}\text{Cd}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Cr}_2\text{Se}_4$  под давлением.

Влияние давления на магнитную спиральную структуру (SS) образца шпинели  $^{114}\text{Cd}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Cr}_2\text{Se}_4$  было измерено с использованием камеры поршень-цилиндр и сапфировых наковален-(КВД) в вертикальной и горизонтальной геометриях. Образец синтезирован с изотопом  $^{114}\text{Cd}$ , малопоглощающим тепловые нейтроны. Получено, что для горизонтальной геометрии при различных давлениях наблюдается мощный нулевой сателлит 000 $^{+}$ -. Определена зависимость периода спирали от давления и получено его уменьшение. Таким образом, происходит «сжатие» простой магнитной спирали (SS) под давлением при низких температурах [32].

### **4.2. Фазовые превращения в материалах, возникающие при изменении межионных расстояний под воздействием сверхвысоких давлений**

Настоящий проект направлен на исследование свойств, фазовых превращений и новых эффектов в простых и сложных материалах, возникающих при изменении межионных расстояний под воздействием сверхвысоких давлений (вплоть до 2-3 Мегабар), высоких температур (вплоть до 3000-5000 К), криогенных температур (2-300 К), и сильных магнитных полей (до 9 Тесла). Такие давления и температуры создаются в камерах высокого давления с алмазными наковальнями. Это позволит решать важные прикладные и фундаментальные задачи материаловедения, задачи синтеза новых веществ, а также фундаментальные задачи геофизики, включая проблемы сильно коррелированных электронных систем (высокотемпературная сверхпроводимость, микроэлектроника,

спинтроника, мультиферроики, нанотехнологии), синтеза новых метастабильных фаз лёгких элементов с уникальными свойствами, проводить изучение свойств и структуры кристаллов в условиях мантии и ядра Земли. Наряду с лабораторными методиками, будут использованы многообразные синхротронные методы для анализа функциональных свойств сильно сжатых материалов.

Предлагаемые исследования обеспечат развитие теоретической и прикладной базы для создания различных классов материалов, имеющих потенциальное применение в новой микроэлектронике, энергетике, обработке материалов и других отраслях индустрии. Часть этих исследований тесно связана с новой бурно развивающейся областью физики магнитных материалов – спинтроникой. Выяснение свойств и взаимодействий между магнитной и электронной подсистемами при изменении межатомных расстояний обеспечит теоретический и прикладной базис для оптимизации свойств и параметров материалов для создания спинтронных устройств. Изучение параметров синтеза и свойств новых материалов на основе лёгких элементов в экстремальных условиях является одной из приоритетных мировых проблем.

Решение этих задач должно обеспечить возможность создания принципиально новых продуктов, прорывных технологий и услуг, и содействовать прогрессу в решении научных задач, поставленных в ходе реализации Федеральных целевых программ.

Целью данной работы является

- исследование структурных и фононных аномалий в сверхпроводящем  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  при высоких давлениях [33];
- исследование решёточного эффекта на сверхобменное взаимодействие в антиферромагнитном  $\text{Bi}_{2.1}\text{Sr}_{1.9}\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  [34];
- автоматизация проведения эксперимента и повышения качества полученных данных при проведении температурных исследований при высоких давлениях;
- разработка программы для проведения измерений высокого сопротивления при криогенных температурах;
- разработка программы для изготовления и подготовки элементов для камеры высокого давления с алмазной наковальней.

#### **4.3. Структурные и фононные аномалии в сверхпроводящем $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ с различным уровнем легирования при высоких давлениях**

Мы исследовали влияние сжатия решетки на кристаллическую структуру сверхпроводника  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2$  с близким к оптимальному легированному и передопированному составу с помощью рентгеновской дифракции. Наши исследования показывают, что при высоких давлениях (до 30 ГПа) уровень легирования не влияет на

кристаллическую структуру этого сверхпроводника. Наряду с этим, структурные аномалии в соотношении появляются при давлении, соответствующем тому, при котором  $T_c$  начинает уменьшаться (см. рисунок 4.1). Этот факт указывает на тесную связь наблюдаемых аномалий со сверхпроводимостью. Мы также исследовали влияние легирования и давления на  $T_c(P)$  и на рамановские активные моды решетки сверхпроводников  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2$ . Обнаружено универсальное подавление  $T_c$  давлением, начиная с критического давления  $P_c$  в диапазоне от 9 до 16 ГПа, в зависимости от уровня легирования образцов  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2$ . Одновременно мы наблюдаем фононные аномалии около 10-20 ГПа, которые указывают на возможное перераспределение заряда под давлением в слоях  $\text{BiO}$ . Эти недавно обнаруженные аномалии могут быть связаны с изменениями в электронной структуре, которые конкурируют со сверхпроводимостью [33].

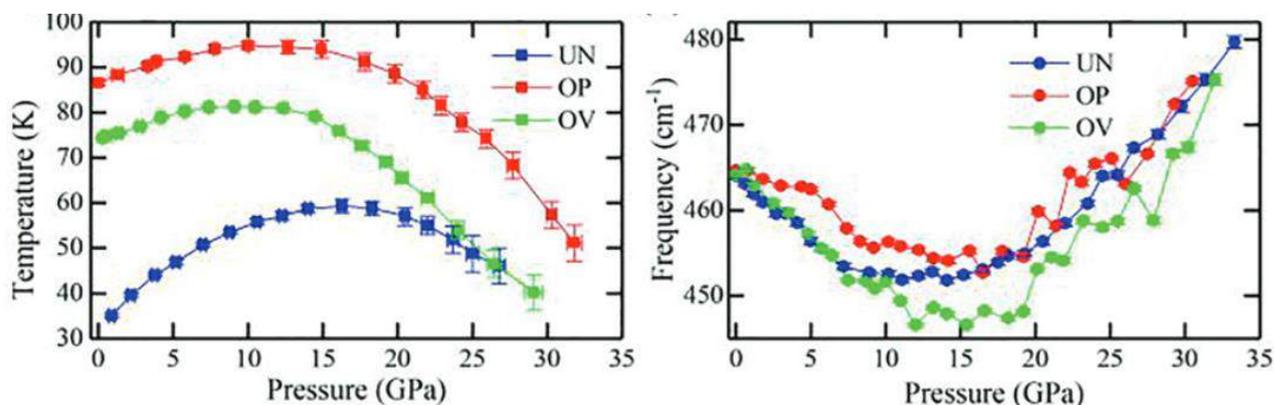


Рисунок 4.1 – Сравнение аномалий на зависимости  $T_c(P)$  и на барических зависимостях фононных мод в сверхпроводящих кристаллах  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2$  с различным допированием

#### 4.4. Решёточный эффект на сверхобменное взаимодействие в антиферромагнитном $\text{Bi}_{2.1}\text{Sr}_{1.9}\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$

Используя методы комбинационного рассеяния света и рентгеновской дифракции в антиферромагнитном  $\text{Bi}_{2.1}\text{Sr}_{1.9}\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  при одинаковых условиях, была изучена эволюция двухмагнного спектра рамановского рассеяния и структурных параметров при высоком давлении до  $P \sim 30$  ГПа (см. рисунок 4.2). Была установлена связь между давлением, параметром решетки в плоскости ( $d$ ) и сверхобменным взаимодействием ( $J$ ) в виде  $J \sim d^{-(6.6 \pm 0.2)}$ . В исследованном диапазоне давлений это соединение не проявляло сверхпроводимости, что было определено с помощью чувствительной магнитной измерительной техники. Кроме того, мы наблюдали фононные аномалии, что указывает на возможные эффекты беспорядка в слоях  $\text{Bi-O}$  и снижение переноса заряда из этих

слоев, особенно выше 10 ГПа. Обсуждалось влияние давления и химического легирования на  $J$  и на структуру, а также их значение для сверхпроводимости [34].

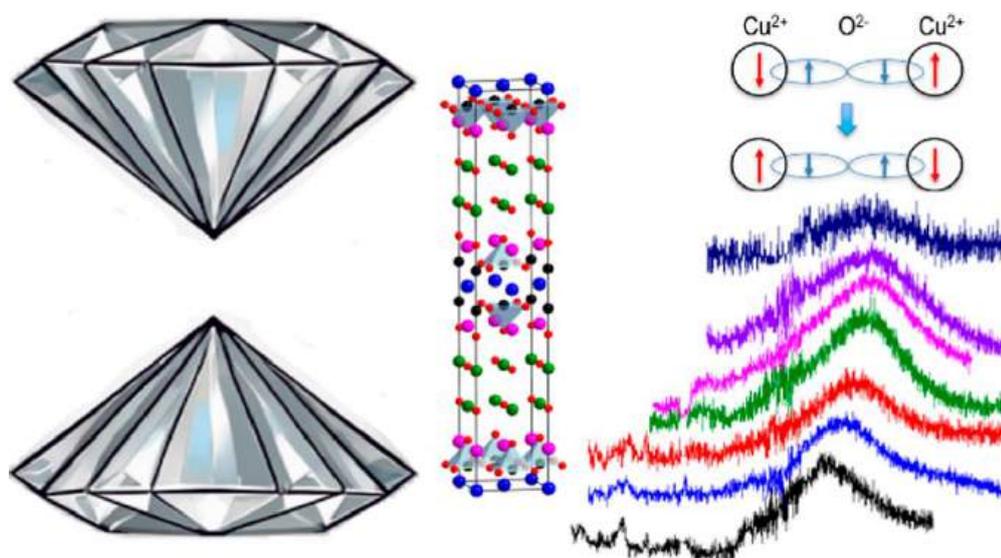


Рисунок 4.2 – Измерение эволюции структуры и спектра двухмагнного рамановского рассеяния под давлением. Обнаружена явная корреляция поведения магнитных возбуждений и величины  $T_c$  в допированном сверхпроводящем варианте данной структуры при росте давления. Эксперимент проводился в алмазных наковальнях

#### 4.5. Программа для проведения измерений высокого сопротивления при криогенных температурах

Разработанная программа реализует алгоритм измерения высокого сопротивления при криогенных температурах. Основная проблема при измерении высокого напряжения связана с реактивными и емкостными компонентами при протекании тока. Данная программа [35] обеспечивает выполнение функций поддержки источника тока Keithley 6221, нано вольтметра Keithley 2182A и контроллера температуры Lakeshore 335; обеспечивает автоматизацию измерения сопротивления, управление полярностью тока и компрессором криостата, позволяет задавать время нарастания напряжения для компенсации паразитной емкости и варьирование времени накопления для компенсации ошибок при измерении высокого сопротивления, позволяет измерять сопротивление до 2 Гом с ошибкой не более 1%. На рисунке 4.3 представлен внешний вид разработанной программы.

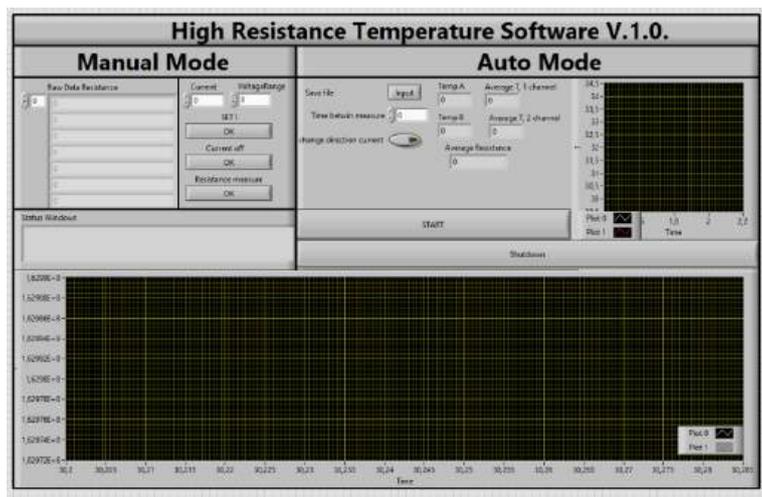


Рисунок 4.3 – Внешний вид программы

#### 4.6. Программы для изготовления и подготовки элементов для камеры высокого давления с алмазной наковальней

Разработанная программа реализует управление UV-лазером для изготовления элементов камер высокого давления. Данная программа [36] обеспечивает выполнение функций поддержки CCD и CMOS камер фирмы Touptek и системы перемещения фирмы STANDA. Программа обеспечивает автоматизацию вырезания различных компонентов камеры высокого давления, таких как гаскета, образец, контактные провода и другие, поддержку открытия и работы по ранее заданному файлу с координатами. На рисунке 4.4 показан внешний вид разработанной программы. На рисунке 4.5 представлены элементы камер высокого давления (тоководы), вырезанные с помощью данной программы.

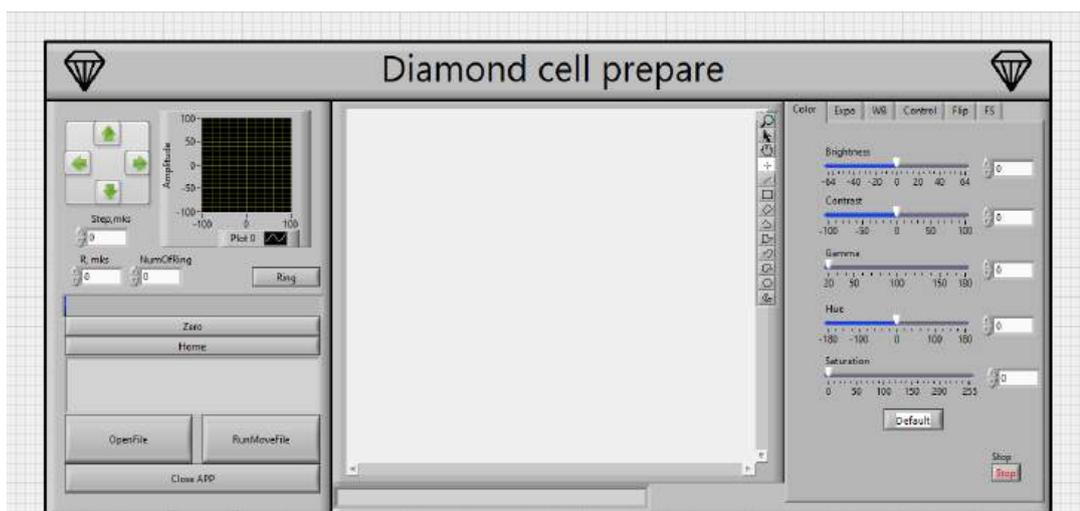


Рисунок 4.4 – Внешний вид программы

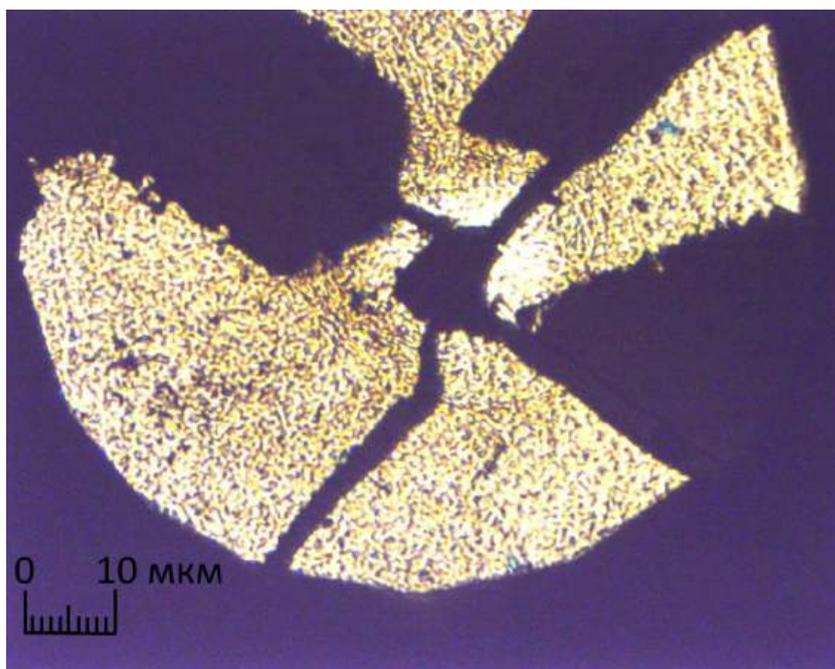


Рисунок 4.5 – Элементы для сборки камеры высокого давления

#### 4.7. Моделирование протяженных дефектов в графене для объяснения его термодинамических свойств.

Ранее [37] нами была предложена модель протяженных дефектов в графене, состоящих из пятиугольных и семиугольных циклов (рисунок 4.6). Это структура, в которой очень мала энергия образования дефектов\атом – 0.581 eV/атом, что гораздо меньше энергии образования точечных дефектов в графене.

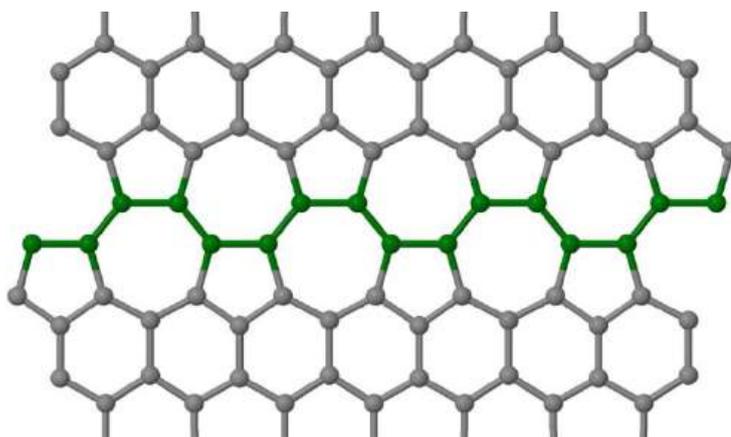


Рисунок 4.6 – Одиночный протяженный дефект в графене. (одномерный зигзаг-дефект)

В работе [38] была вычислена прибавка теплоемкости графена, которая обеспечена наличием данных одномерных зигзаг-дефектов. Однако при сравнении теоретической теплоемкости с экспериментальными данными, полученными при плавлении пиролитического графита [39] оказывается, что теоретическая величина теплоемкости в 3 раза меньше, чем получено в эксперименте. Поэтому мы предположили, что каждый атом

графена может участвовать в одновременно в 3-х направлениях протяженных дефектов, и при пересечении одномерных дефектов получится двумерная сеть, минимальная ячейка которой изображена на рисунке 4.7. Таким образом, протяженные дефекты в графене могут образовывать нерегулярную двумерную сеть.

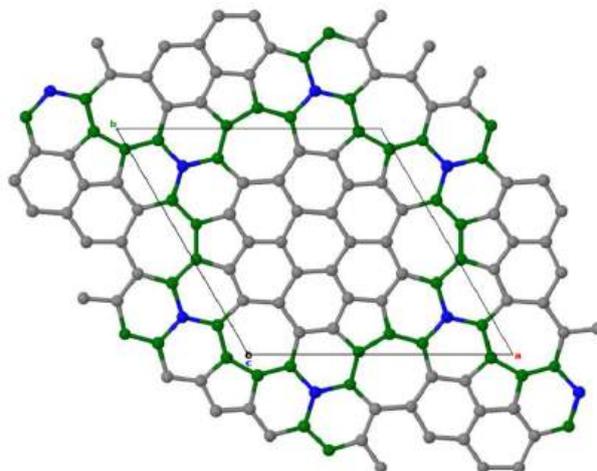


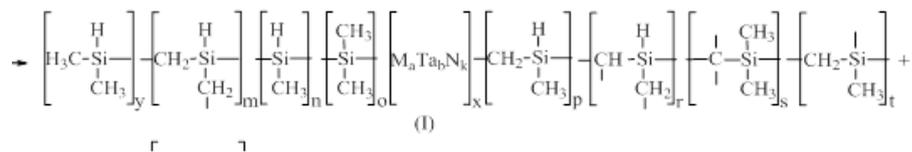
Рисунок 4.7 – Минимальная ячейка кристаллической структуры при пересечении одномерных протяженных дефектов

С помощью программы Quantum Espresso на основе DFT теории из первых принципов была вычислена прибавка свободной энергии при пересечении одномерных дефектов в составе нерегулярной двумерной сети дефектов, и определены нижний и верхний пределы температуры плавления, которая обусловлена наличием данных дефектов. Экспериментальная величина температуры плавления графита (4800 К) попадает в этот интервал. Результаты исследования опубликованы в работе [40].

#### **4.8. Рентгеновские исследования термостойких волокон на основе карбида кремния, модифицированных атомами тугоплавких металлов**

Современный подход к созданию керамических материалов определенного состава – это использование в качестве исходных соединений керамообразующих поли(олиго)мерных предшественников контролируемого строения и состава, термотрансформация которых приводит к образованию высокочистой керамики заданного состава, а также волокон и композитных материалов.

Соконденсацией олигодиметилсилиленметиленов и алкиламидов тугоплавких металлов (Ta и Zr) в институте ГНИИХТЭОС (Ростех) были синтезированы керамообразующие металлокарбосиланы  $\{Ta(Zr)ПКС\}$  – полимеры с молекулярной массой 1000-1300 г., с заданным мольным отношением атомов тугоплавких металлов Ta и Zr.



После модификации смешанными карбидами Ta<sub>4</sub>ZrC<sub>5</sub> при температурах 1250, 1500 и 1900 С из них изготовлены полимерные волокна, проведено их отверждение и керамизация. В зависимости от температуры пиролиза размеры нанокристаллитов и процент аморфной составляющей в волокнах менялся. Для образца волокон Si/Ta/Zr C, пиролизованых при 1900°С можно провести количественный рентгенофазовый анализ, по результатам которого в волокне было обнаружено две кристаллических фазы: SiC - муассанит - 3С и смешанный карбид Ta<sub>0.8</sub>Zr<sub>0.2</sub>C с кристаллической структурой типа NaCl (см. Рисунок 4.8 ). Результаты исследования опубликованы в статье [41].

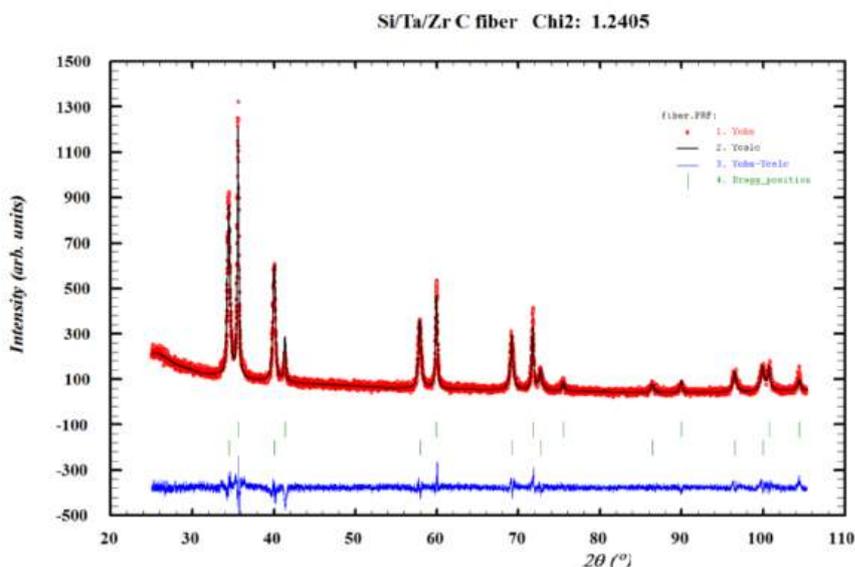


Рисунок 4.8 – Полнопрофильный анализ методом Ритвельда дифрактограммы волокон Si/Ta/Zr C, полученной при  $\lambda \text{ CuK}\alpha 1=1.5406\text{\AA}$

## **5. Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, с целью улучшения и оптимизации параметров установок**

### **5.1. Использование спектров нейтронных реакций, полученных методом СВЗ для получения более достоверных сведений о характеристиках атомных ядер**

Физическая установка – спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце (СВЗ-100) расположена в Экспериментальном комплексе Института ядерных исследований (ЭК ИЯИ РАН) и используется для исследования реакций взаимодействия нейтронов с ядрами изучаемых элементов. В серии совместных экспериментов ИЯИ РАН и ГНЦ РФ – ФЭИ по измерению сечений деления младших актиноидов, выполненных на СВЗ-100, обзор результатов которых в сопоставлении с дополняющими данными других центров опубликован в работах [42, 43], получены важные результаты, вошедшие в мировые базы нейтронных данных. Ряд результатов был получен впервые, на основе использования высокой светосилы СВЗ-100, что обеспечило возможность измерений нейтронных сечений на микроскопических высоко радиоактивных образцах.

Недостатком прибора, однако, является низкое разрешение, которое следует преодолеть. Используя функцию отклика спектрометра, можно решить задачу восстановления аппаратурных спектров (обратная задача) до параметров близких к "истинным". Задача спектрометрии описывается уравнением Фредгольма 1-го рода. По известным последствиям (аппаратурный спектр) следует определить причину ("истинный" спектр), т.е. решить обратную задачу. Регистрировались спектры радиационного захвата нейтронов ( $n, \gamma$ ) и спектры деления элементов под воздействием нейтронов ( $n, f$ ) – аппаратурные спектры.

#### **5.1.1. Преодоление недостатка метода СВЗ (слабое энергетическое разрешение) путём использования Ф.О. спектрометра и компьютерных технологий. Метод итераций для решения некорректных задач**

В нашем случае обратная задача является некорректно поставленной, т.к. не выполняется требование устойчивости решения. Общий математический подход к решению подобных задач был разработан академиком Тихоновым А.Н. и называется методом регуляризации [44]. Конкретный способ используемый в данной работе называется методом итераций для нахождения приближённых решений, впервые обоснованный в [45].

#### **5.1.2. Решение задачи восстановления спектров**

Разработан программный комплекс, позволяющий путём большого количества приближающих итераций добиться получения энергетических спектров с лучшим

разрешением, чем аппаратурные спектры, полученные в эксперименте, см. рисунок 5.1. На нём приводятся спектры радиационного захвата нейтронов ядрами сурьмы (естественная смесь изотопов), исходный спектр и восстановленный спектр. Как видно из графика, три неразрешённых резонанса после применения процедуры восстановления разделились. Энергетическое разрешение исходного спектра 35%, а восстановленного – 9%. Проведено сравнение восстановленного спектра радиационного захвата нейтронов ядрами сурьмы с соответствующим спектром из базы данных JENDL [46], см. рисунок 5.2.

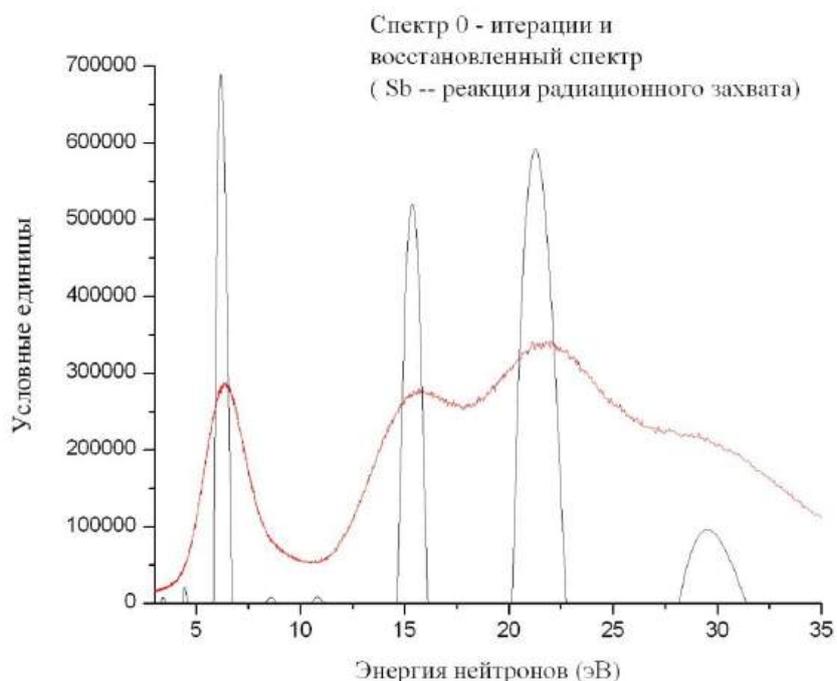


Рисунок 5.1 – Спектр 0-итерации (исходный спектр) и восстановленный методом итераций (Sb)

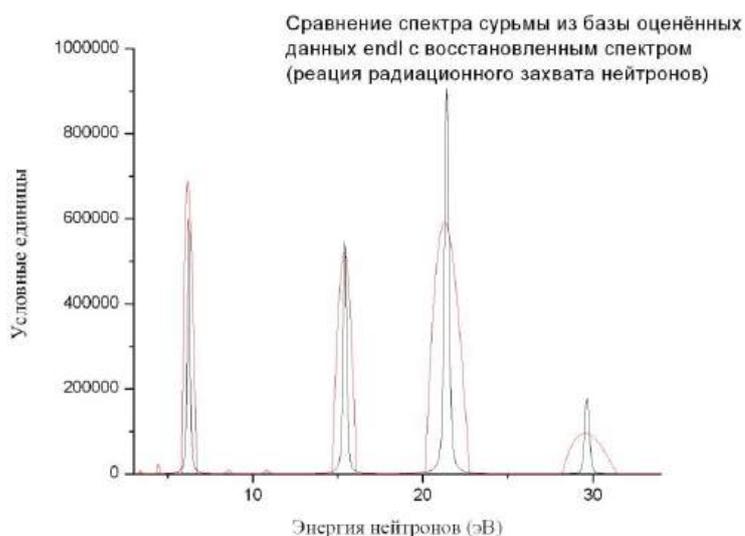


Рисунок 5.2 – Сравнение восстановленного спектра сурьмы и спектра из базы данных JENDL

Предложенный метод позволил выполнить методическую работу по определению составных частей экспериментального фона установки СВЗ-100 при использовании гамма-счётчика, см. рисунок 5.3.

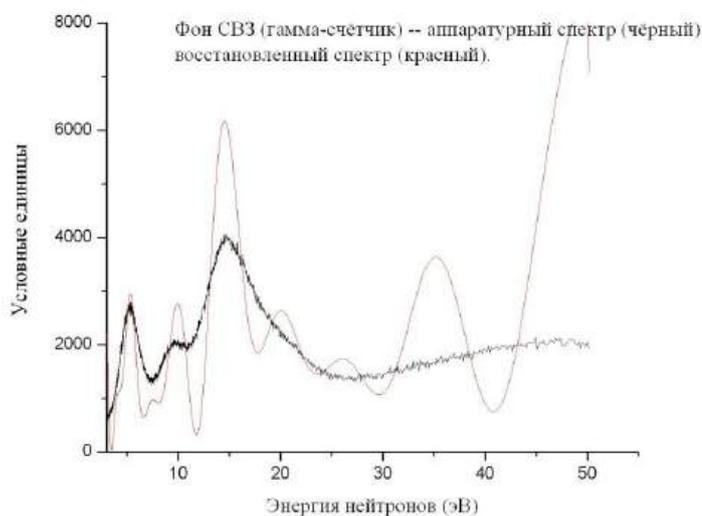


Рисунок 5.3 – Состав экспериментального фона установки СВЗ-100 при использовании гамма-счётчика в заданном энергетическом интервале

### 5.1.3. Использование функции отклика спектрометра СВЗ-100 для получения "истинных" спектров

Функция отклика (Ф.О.) спектрометра (СВЗ-100), которая используется в программном комплексе представляет собой квадратную матрицу (1801x1801)  $M_{tE}$ , характеризующую плотность вероятности зарегистрировать событие (акт деления или радиационного захвата) в момент времени  $t$  при энергии нейтрона равной  $E$ . Каждая строка соответствует определённому времени, каждый столбец соответствует определённой энергии.

Для формирования Ф.О. использовалась плотность нейтронов, которая определялась с использованием данных полученных на детекторе с  ${}^7\text{Li}$ , расположенном в измерительном канале, а распределение нейтронов по энергиям в определённый момент времени соответствовало гауссову.

Вопрос определения плотности нейтронов в замедлителе с использованием детектирующих элементов, имеющих сечения реакций с нейтронами  $1/V$ , рассматривался в [47]. Из-за высокой светосилы нейтронного спектрометра СВЗ-100 требуются нейтронные счётчики, способные регистрировать сверхвысокие потоки частиц (см. рисунок 5.4). Необходимо, чтобы детектор имел минимальные размеры, маленькую массу и высокое быстродействие.



Рисунок 5.4 – Нейтронный счётчик для сверхвысоких нейтронных потоков

Исследование функции отклика СВ3-100, где в качестве спектральной характеристики временного канала брался искажённый гауссиан, что возможно позволит улучшить Ф.О., проводилось в работе [48].

Работу модуля вычислителя псевдоаппаратурного спектра можно проиллюстрировать следующим рисунком 5.5.

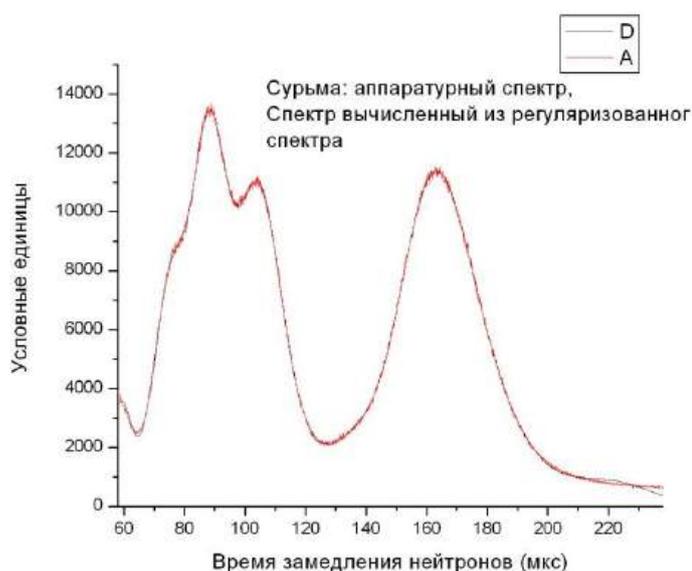


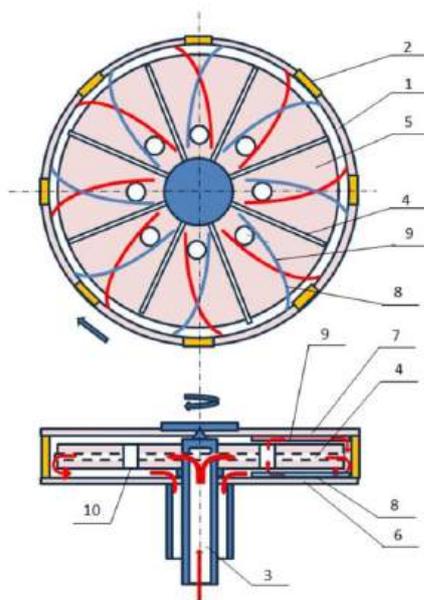
Рисунок 5.5 – Сравнение аппаратурного спектра (красный) с вычисленным (чёрный)

На рисунке 5.5 представлен аппаратурный спектр и вычисленный спектр реакции радиационного захвата нейтрона ядрами естественной смеси элемента Sb. Как видно, графики хорошо совпадают за исключением начальной и конечной частей, где проявляются краевые эффекты функции отклика.

## 5.2. Совершенствование приборной базы и мишеней нейтронного комплекса с целью повышения информативности по контролируемым параметрам и безопасности за счет установки современных приборов контроля и наблюдения

Исходя из опыта разработки и создания импульсного источника нейтронов ИЯИ РАН [11], предложена схема компактного источника тепловых и холодных нейтронов с вращающейся мишенью с касательным расположением замедлителей и отражателей, обеспечивающие низкий фон от промежуточных, быстрых нейтронов и гамма-квантов.

Рассмотрена бериллиевая мишень толщиной  $\sim 1$  мм, что заведомо ниже длины ионизационного пробега протона с его остановкой непосредственно в воде, охлаждающей мишень (что снизило накопление водорода в теле мишени), и что позволило увеличить площадь мишени более чем на порядок по сравнению с площадью поперечного сечения пучка за счет вращения. Эти два фактора позволили поднять расчетный срок службы мишени с двух недель до пяти лет. Схема мишени приведена на рисунке 5.6.



2 – все окна, 8, 9 – лопатки, совмещенные с ребрами жесткости  
Рисунок 5.6 – Схема вращающейся мишени

Скорость вращения подбиралась так, чтобы каждый импульс протонов попадал на мишень рядом с предыдущим, не перекрывая друг друга, что обеспечило низкую тепловую нагрузку на мишень. Основным определяющим фактором стал нагрев материала за время импульса и связанные с ним термомеханические напряжения. Для снижения давления воды внутри вращающегося элемента мишени на верхней и нижней торцевой поверхности мишени расположены специальные лопатки (которые одновременно выполняют роль ребер жесткости), обеспечивающие втягивание и

выталкивание теплоносителя. Таким образом, вращающийся элемент одновременно выполняет роль своеобразного насоса, обеспечивая низкое давление теплоносителя в камере. Замедлители и отражатели вынесены за пределы вакуумной камеры для удобства эксплуатации, замены и изменение их конфигурации в случае необходимости. (рисунок 5.7).

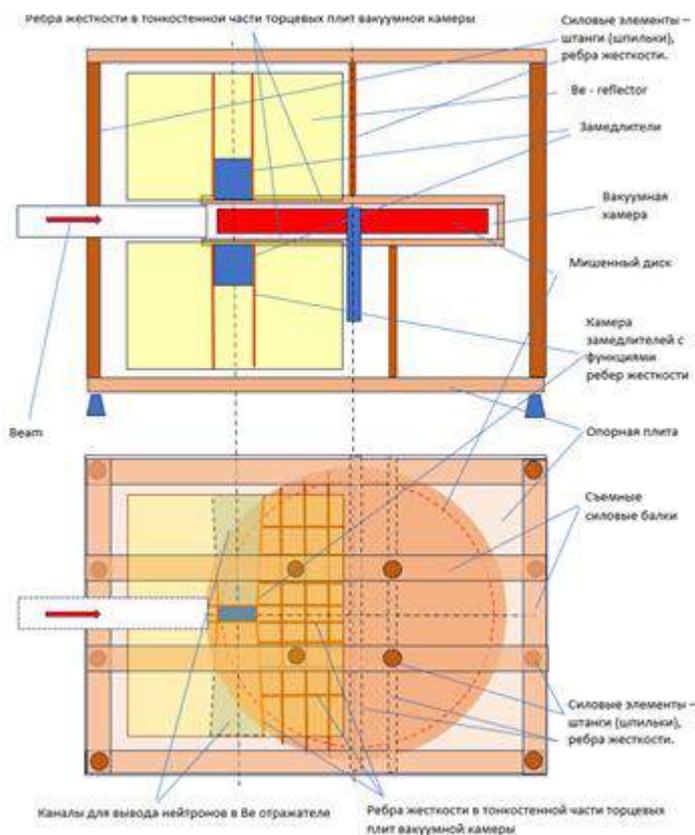


Рисунок 5.7 – Схема расположения замедлителей и силовых элементов

Для снижения толщины стенок вакуумной камеры и других технологических стенок с целью сокращения захвата нейтронов предложена специальная конструкция, обеспечивающая разгрузку тонкостенных конструкций и их устойчивость.

Расчетно-техническое обоснование позволило приступить к созданию прототипа компактного источника нейтронов с горизонтальной осью вращения, см. рисунок 5.8.

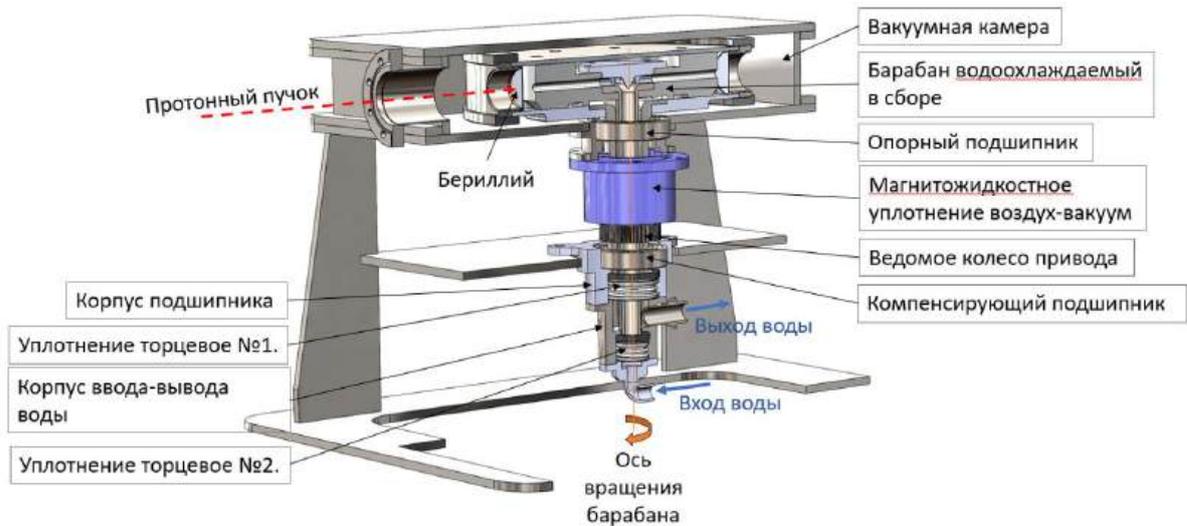


Рисунок 5.8 – Прототип компактного источника нейтронов с горизонтальной осью вращения

Для комплекса импульсных источников нейтронов ИЯИ РАН установлены дополнительные приборы контроля состояния первого радиоактивного контура охлаждения, обеспечивающие контроль проводимости воды, скорости коррозии материалов и визуализацию процессов, см. рисунок 5.9.

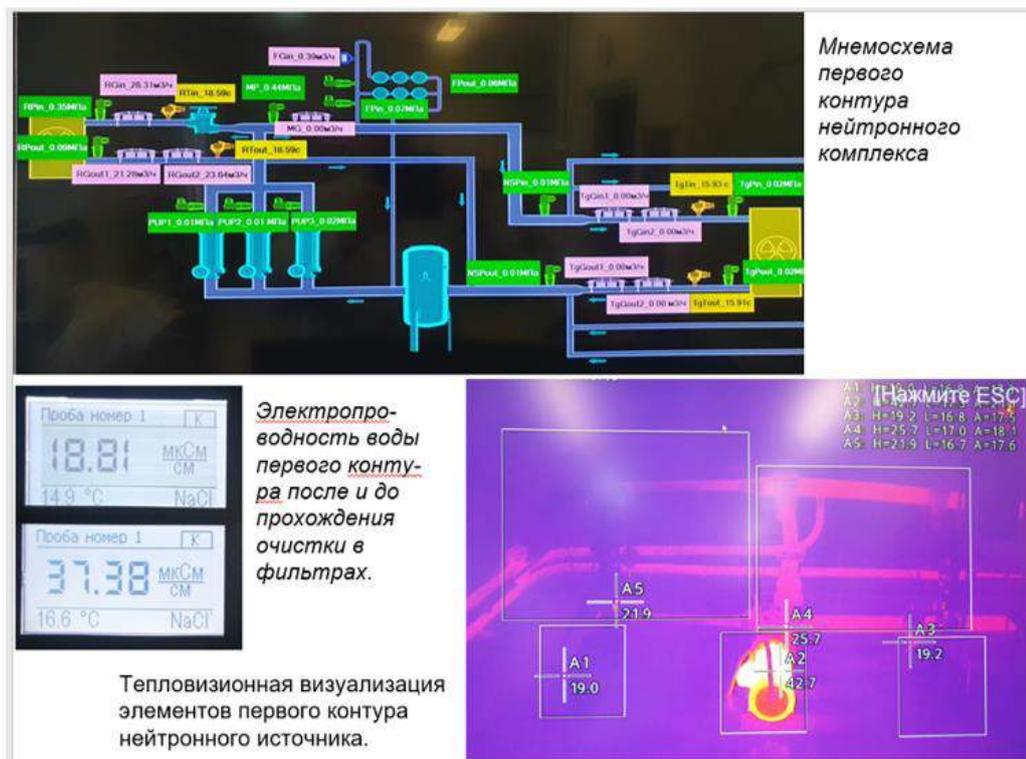


Рисунок 5.9 – Мнемосхема первого радиоактивного контура нейтронного источника, тепловизионная визуализация элементов первого контура и показания электропроводности теплоносителя

### 5.3. Радиационное материаловедение

Структурные материалы перспективных термоядерных реакторов будут находиться в условиях беспрецедентных потоков излучения и тепла, которые пока недостижимы экспериментально. Компьютерное моделирование способно обеспечить качественную и количественную оценку деградации свойств материалов в соответствующих экстремальных условиях и тем самым дополнить имеющиеся экспериментальные результаты. Для моделирования эволюции радиационных повреждений металлов при дозах облучения, ожидаемых в термоядерных реакторах ( $\sim 100 \text{ dpa}$ ), наиболее эффективными, особенно в случае пространственно-неоднородных повреждений, все ещё являются математические методы, основанные на теории среднего поля.

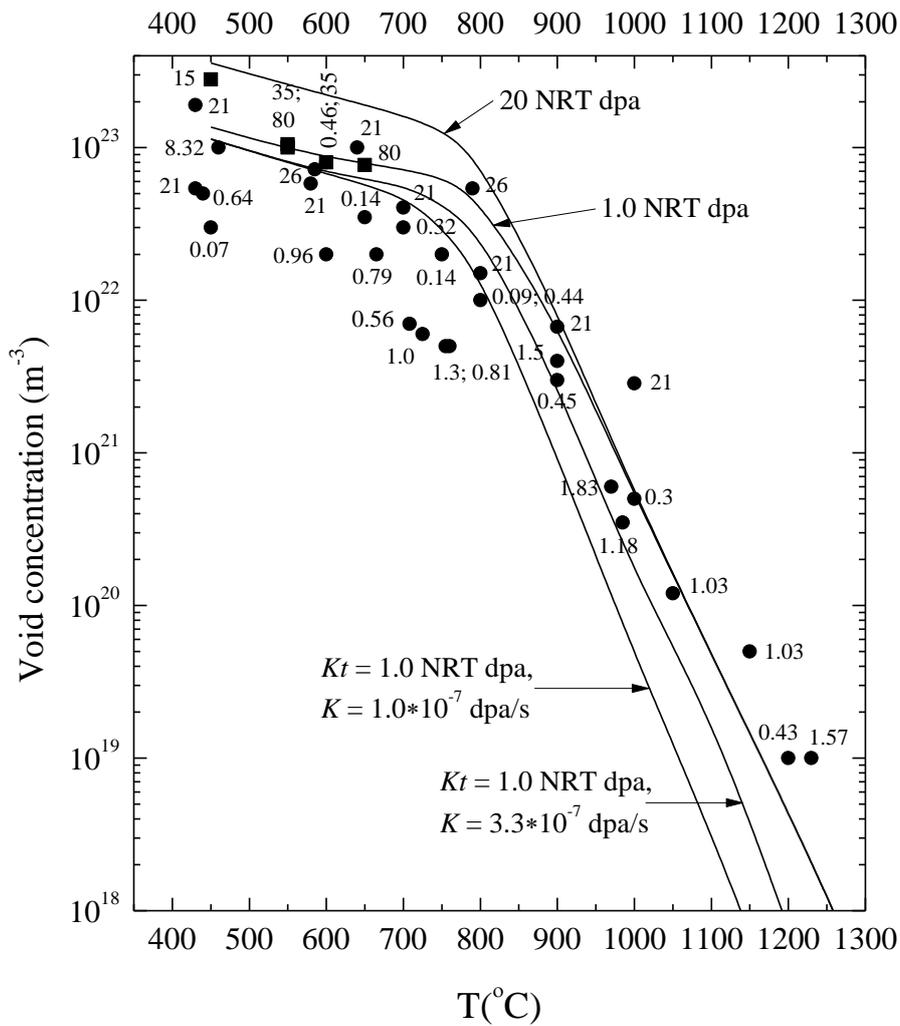
В рамках данной методологии мы рассматривали зарождение и последующий рост вакансионных пор, которые представляют собой один из основных компонентов микроструктуры радиационных повреждений. Помимо прямых изменений объема облучаемого материала, которые отрицательно сказываются на его свойствах, наличие пустот означает, что некомпенсированные междоузельные атомы в количестве, соответствующем чистому накоплению вакансий в порах, постоянно видоизменяют существующую дислокационную микроструктуру и распределение примесей. Явления, модерируемые дислокациями, как правило, пространственно неоднородны и, в свою очередь, влияют на эволюцию локального ансамбля пустот.

В то время как самые маленькие зародыши пор обычно состоят всего из нескольких вакансий, пустоты при дозах облучения, характерных для термоядерных реакторов, могут содержать сотни тысяч и миллионы вакансий. Это означает, что пространство размеров вакансионных пор очень обширно, и традиционная трактовка эволюции ансамбля пустот требует решения очень большого набора обыкновенных дифференциальных уравнений, который становится непомерно большим в пространственно-зависимом случае. Более того, в обычной системе уравнений учитываются только статистические флуктуации, связанные со случайными скачками точечных дефектов. Флуктуациями потоков точечных дефектов, вызванными случайным (во времени и пространстве) образованием точечных дефектов в каскадах столкновений, обычно пренебрегают.

Классическая теория зародышеобразования предлагает возможный способ преодоления вышеупомянутой трудности. В её рамках предполагается, что при достаточно большом размере сверхкритической полости вероятность того, что пора такого размера станет подкритической, пренебрежимо мала. Другими словами, стохастические флуктуации практически не влияют на рост данной поры. Используя классический

подход, скорость зарождения растущих сверхкритических пустот может быть рассчитана в любой заданный момент времени в соответствии с местными условиями [49]. Дальнейшая эволюция растущих вакансионных пор определяется простым кинетическим уравнением Лиувилля для функции распределения пор в пространстве размеров.

Для рассмотрения непрерывного зарождения и последующей эволюции вакансионных пор вплоть до доз облучения, ожидаемых в термоядерных реакторах (~ 100 дпа), классическая теория зарождения была модифицирована с учетом как случайного характера миграции точечных дефектов, так и случайной генерации свободных точечных дефектов в каскадах столкновений, а также флуктуирующей скорости эмиссии вакансий из пор [49]. По мере эволюции ансамбля пор, в рамках теории среднего поля, рассчитываются соответствующие изменения концентраций подвижных дефектов, непрерывно генерируемых радиационным облучением. Численные расчеты выполнены для всего температурного диапазона вакансионного распухания в молибдене. Сравнение с экспериментальными данными показывает (рисунок 5.10), что настоящая методика достаточно хорошо описывает эволюцию ансамбля пустот при повышенных температурах, когда существенна эмиссия вакансий. При более низких температурах, когда критический размер пустот невелик, существует тенденция к некоторому завышению общей концентрации пустот. Это является результатом пренебрежения в уравнении Лиувилля влиянием стохастических флуктуаций на разброс в распределении растущих пор по размерам, что уменьшает долю более крупных пустот во всем ансамбле и, как следствие, ведет к недооценке силы стоков, создаваемой ансамблем пор, при той же их концентрации. Однако, принимая также во внимание высокую чувствительность зарождения новой фазы к параметрам материала, неопределенности и наблюдаемые вариации экспериментальных данных, настоящий подход, основанный на классической методологии, вполне удовлетворительно описывает образование пор во всей температурной области вакансионного распухания и в широком диапазоне доз облучения. По результатам работы подготовлена статья, которая одобрена экспертной комиссией внутреннего экспортного контроля ИЯИ РАН для публикации в *Journal of Nuclear Materials*.



$K$  – номинальная (NRT dpa/s) скорость генерации точечных дефектов в каскадах столкновений

Рисунок 5.10 – Температурная зависимость концентрации вакансионных пор в молибдене при различных дозах облучения. Цифры рядом с экспериментальными данными, взятыми из работ 50 (●) и 51 (■), указывают дозы облучения в NRT dpa

## **6. Развитие новых методов исследований фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов**

### **6.1. Исследование низколежащих р-волновых нейтронных резонансов**

Цель работы - измерение характеристик р-волновых резонансов, в том числе с целью последующей проверки соответствия распределений этих характеристик стандартным статистическим моделям, поиск Т-неинвариантных эффектов.

Работы по развитию новых методов исследования фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов ведутся совместно с ЛНФ ОИЯИ по «Соглашению о сотрудничестве № 129» о выполнении совместной научно-исследовательской работы. Измерения ведутся на импульсном источнике нейтронов ИРЕН.

#### **6.1.1. Создание прототипа установки для исследования р-волновых нейтронных резонансов**

Трудности в изучении р-волновых нейтронных резонансов связаны с их малыми нейтронными ширинами и, соответственно, малыми сечениями в р-волновых резонансах. Типичная величина сечения  $(n, \gamma)$ -реакции в р-волновом резонансе при энергии нейтронов меньшей 1 кэВ составляет  $\approx 1б$ , в то время как сечение потенциального рассеяния нейтронов составляет  $(5 - 10)б$ , а сечения  $(n, \gamma)$ -реакции от хвостов s-волновых резонансов может быть сравнимо или превосходить сечение в р-волновых резонансах.

Чтобы оценить возможность исследования низколежащих р-волновых нейтронных резонансов, на 4-ом канале ИРЕН создан прототип будущей установки. Он представлял собой вакуумированный канал с коллиматором внутри. Исследуемый образец мог располагаться как внутри канала, так и снаружи. В качестве детекторов использовались 6 сцинтилляционных детекторов ВГО, которые располагались на расстоянии 15 см от образца. Аналоговые сигналы с детекторов приходили на оцифровщик ЦРС-32 работающий с тактовой частотой 200 МГц. Оцифровщик управлялся программой “romana”, которая могла оперативно представлять времяпролетные амплитудные спектры и сохранять оцифрованные сигналы в памяти компьютера.

Было выполнено несколько измерений потоков нейтронов с помощью облучения золотых фольг. В результате получили: поток тепловых нейтронов  $F_{th} = 15000 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , поток резонансных нейтронов  $F_{res} = 6000 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ .

Проект установки был представлен в виде доклада [52].

Форма нейтронного импульса имеет вид:

$$n(t) = (1 + \exp(-t/\tau)), 0 < t < t_0; n(t) = [(1 + \exp(-t/\tau))] \cdot \exp(-(t-t_0)/\tau), t > t_0. \quad (5)$$

Здесь  $t_0$  – длительность электронного импульса,  $\tau$  – время утекания нейтронов из замедлителя. Функция разрешения в этом случае имеет вид:

$$R(E, E') = 0, \text{ если } E' < E - \varepsilon_0;$$

$$R(E, E') = (1 - \exp(-t_0/\tau) \cdot \exp(-((E' - E)/\tau \cdot W)))/\varepsilon_0, \text{ если } E - \varepsilon_0 < E' < E;$$

$$R(E, E') = (1 - \exp(-t_0/\tau)) \cdot \exp(-((E' - E)/\tau \cdot W))/\varepsilon_0, \text{ если } E' > E,$$

где  $\varepsilon_0 = 2t_0E^{3/2}/(72,3L)$ ,  $W = 2E^{3/2}/(72,3L)$ , а  $L$  – длина пролетной базы.

Определение параметров  $t_0$  и  $\tau$  производилось на основе подгонки свертки функции разрешения с функций выхода гамма квантов  $Y_{\text{exp}}(E) = \int R(E, E') Y_{\gamma}(E') dE'$ , а  $Y_{\gamma}(E')$  – теоретический выход гамма квантов. Для определения функции разрешения нейтронного импульса были измерены времяпролетные спектры  $(n, \gamma)$ -реакции на ниобии.

На рисунке 6.1 представлены результаты определения параметра  $\tau$  в зависимости от энергии нейтронов определенного из подгонки резонансов на разных ядрах.

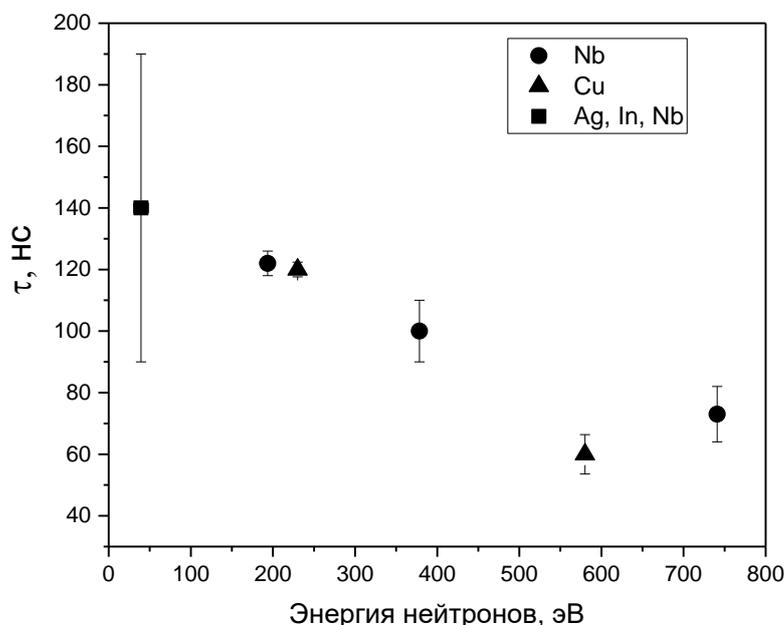


Рисунок 6.1 – Величина параметра  $\tau_{\text{ex}}$  в зависимости от энергии нейтронов

Методом Монте-Карло с помощью кода MCNP был выполнен расчёт времени пролёта нейтронов выделенных энергий от источника до детектора, расположенного на 10-метровой пролётной базе. Выбранные для расчёта энергии нейтронов соответствовали энергиям резонансов, в которых проводилась подгонка с целью определения параметров функции разрешения. На рисунке 6.2 показаны результаты моделирования величины  $\tau_{\text{cal}}$  (красные кружочки) для нейтронов с энергиями 35.85 эВ, 193.6 эВ, 378.4 эВ, 741.0 эВ и  $\tau_{\text{ex}}$  – черные квадратики. Видно, что получено удовлетворительное согласие.

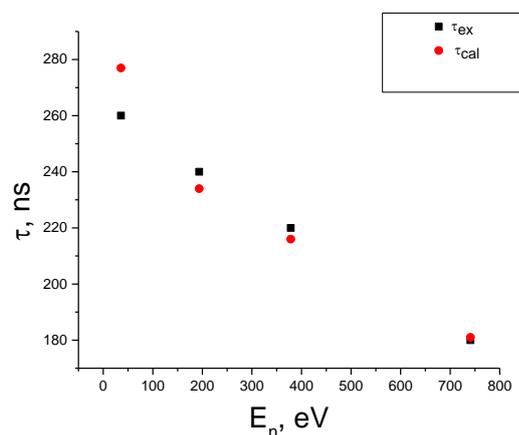


Рисунок 6.2 – Черные квадратики – величина  $\tau_{ex}$ , определенная из экспериментальных данных, красные кружочки – величина  $\tau_{cal}$ , определенная с помощью моделирования по MCNP

### 6.1.2. Определение зависимости потока нейтронов от энергии нейтронов.

Энергетическая зависимость нейтронного потока в диапазоне энергий нейтронов  $\sim 1 - 200$  эВ была определена по выходу  $\gamma$ -квантов в нейтронных резонансах  $^{181}\text{Ta}$ . Измерения реакции  $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)$  проводились на 3-ем канале установки ИРЕН на пролетной базе 60 м. Для регистрации  $\gamma$ -квантов применялся большой жидкостный сцинтилляционный детектор. В качестве образца использовалась танталовая фольга толщиной 0,11 мм, размером  $12,2 \times 15,4$  см. На рисунке 6.3 представлен выход  $\gamma$ -квантов реакции  $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)$  в зависимости от энергии нейтронов, полученный за 3,5 часа набора, который и использовался в дальнейшей обработке.

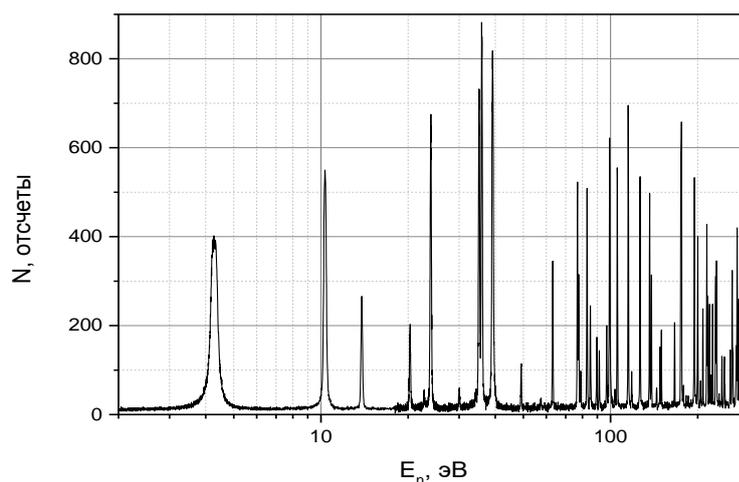


Рисунок 6.3 – Выход  $\gamma$ -квантов реакции  $^{181}\text{Ta}(n, \gamma)$  в зависимости от энергии нейтронов

Определение энергетической зависимости плотности нейтронного потока проводилось с использованием приемов, характерных для метода площадей, применяемого при исследовании нейтронных резонансов [53]. В методе площадей

резонансные параметры извлекаются из полной суммы отсчетов под резонансом, и поэтому функция разрешения спектрометра не используется.

Из спектра на рисунке 6.3 в диапазоне  $\sim 1$  эВ –  $\sim 200$  эВ было выбрано для расчетов 22 резонанса – 10 со спином и четностью  $J^\pi = 3^+$  и 12 с  $J^\pi = 4^+$ .

Известно, что при замедлении быстрых нейтронов зависимость плотности нейтронного потока в резонансной области имеет вид:

$$f(E) \sim \frac{1}{E^{\beta_\alpha}}, \quad (6)$$

$$\beta_\alpha = 1 - \alpha. \quad (7)$$

Параметр  $\alpha$  зависит от характеристик замедлителя.

На рисунке 6.4 представлены результаты определения  $\beta_\alpha$  и  $\alpha$ .

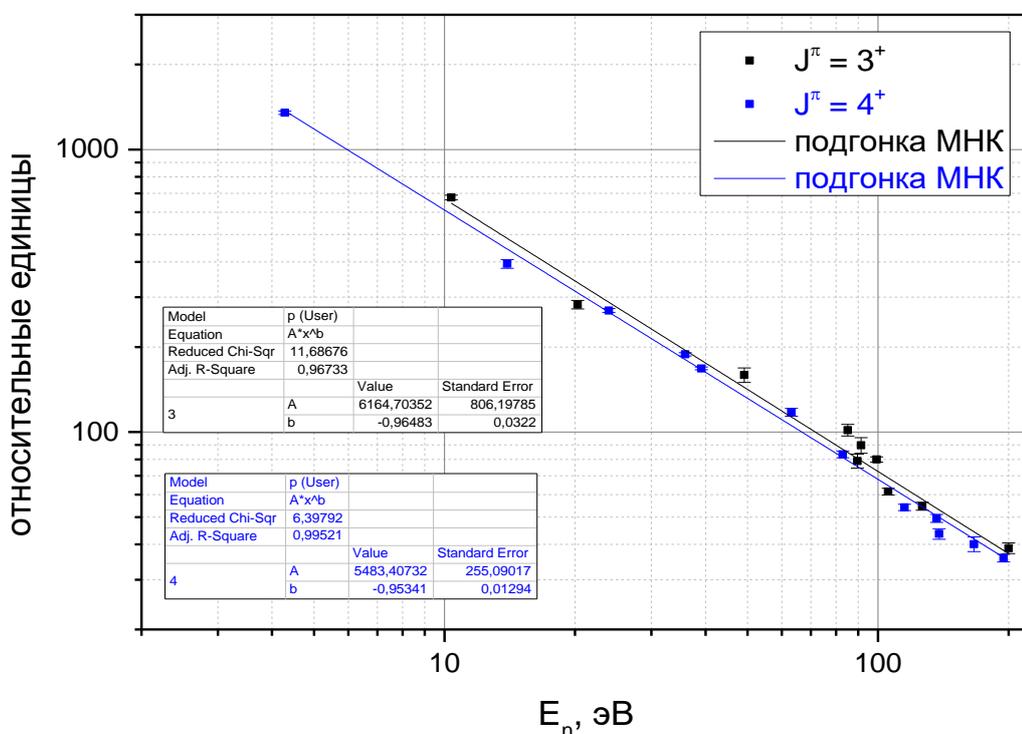


Рисунок 6.4 – Зависимость плотности потока нейтронов от энергии, полученная по резонансам реакции  $^{181}\text{Ta}(n,\gamma)$  для резонансов с  $J^\pi = 3^+$  (■) и с  $J^\pi = 4^+$  (■). Черная и синяя линии – результаты подгонки МНК для экспериментальных точек соответствующего цвета

Параметры  $\beta_\alpha$  и  $\alpha$  находились из подгонки методом наименьших квадратов функции вида  $Ax^b$  к экспериментальным данным. Подгонка осуществлялась отдельно для резонансов с разными спинами, так как в общем случае множественность и энергии  $\gamma$ -квантов при распаде компаунд-состояний с различными спинами, а, следовательно, и эффективности регистрации таких событий, могут отличаться. Результаты также представлены на рисунке 6.4. Видно, что подгоночные кривые для данных с разными

спинами различаются, но значения параметров перекрываются в пределах одного стандартного отклонения. Окончательные результаты  $\beta_\alpha$  и  $\alpha$ , представленные в 1-ой строке таблицы 2, – средние значения подгонок для двух спинов. Во 2-й и 3-й строках представлены результаты моделирования с кодом MCNP и с кодом Geant4.

Таблица 2 – Экспериментальные и расчетные значения параметров  $\beta_\alpha$  и  $\alpha$  с погрешностью определения  $\sigma$

	$\beta_\alpha$	$\alpha$	$\sigma$
Эксперимент	0.9547	0.0453	0.0042
MCNP	0.9544	0.0456	0.0061
Geant4	0.9446	0.0554	0.0029

### 6.1.3. Разработка методики измерения и обработки времяпролетных и амплитудных спектров гамма квантов в р-волновых резонансах

В прошлом году мы исследовали образец KBr, так как на р-волновом резонансе Br-81 наблюдался большой Р-нечетный эффект. Однако, анализ показал, что асимметрия вперед-назад может быть искажена реакцией  $(n, \gamma)$  нейтронов рассеявшихся на ядрах K и Br-79.

Методом Монте-Карло были сделаны расчеты влияния поглощения рассеянных нейтронов на угловое распределение  $\gamma$  квантов в  $(n, \gamma)$ - реакции на  $^{109}\text{Ag}$  в области р-волнового резонанса 37,2эВ. Оказалось, что обнаружить ложную асимметрию вылета  $\gamma$ -квантов вперед-назад на уровне  $\approx 3\%$  можно на образце толщиной 0,35 см [54, 55].

С целью проверить возможность определения параметров р-волновых резонансов, было решено использовать в качестве образца  $^{93}\text{Nb}$ . Во-первых, ниобий – моно-изотоп, во-вторых, у него маленькое сечение рассеяния, в-третьих, в ниобии много р-волновых резонансов и, в-четвертых, в работе [56] были определены парциальные нейтронные ширины, представленные в таблице 3. В выбранном нами методе определения парциальных нейтронных ширин, годятся резонансы 35,8 эВ и 42,2 эВ.

Таблица 3 – Резонансные параметры низколежащих р-волновых резонансов  $^{93}\text{Nb}$

Nucleus	p-resonance	$\Gamma_{n,1/2}^p / \Gamma_n^p$
$^{93}\text{Nb}$	35.8 eV	0.70±0.08
	42.2 eV	0.27±0.17
	94.3 eV	0.84±0.13

На рисунке 6.5 представлена асимметрия вперед-назад в зависимости от времени пролета нейтронов и счет  $\gamma$ -квантов детекторами вперед и назад.

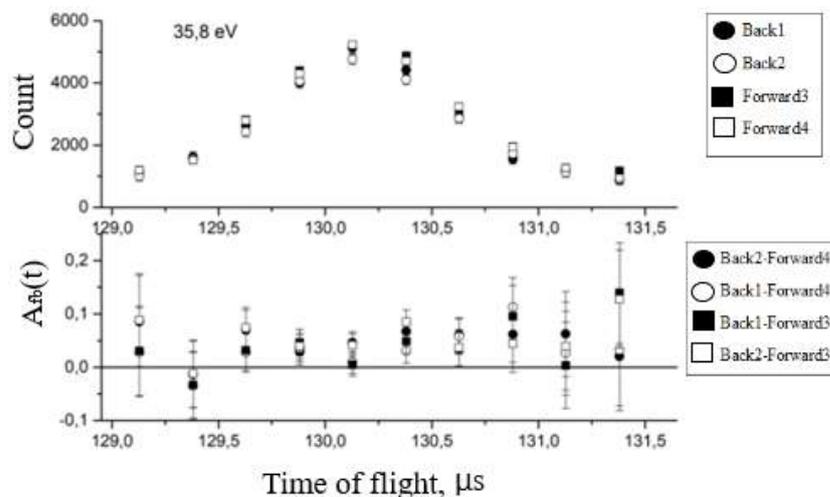


Рисунок 6.5 – Счет  $\gamma$ -квантов детекторами вперед и назад (вверху) и асимметрия вперед-назад (внизу)

Видно, что асимметрия  $A_{fb} \leq 0,06$ , в то время как результаты измерений асимметрии вперед-назад на ядрах  $^{117}\text{Sn}$  и  $^{113}\text{Cd}$  [3] дают величину порядка 30%. Главным отличием нашей работы от работы [3] является регистрация всех  $\gamma$ -квантов каскада. Если считать, что асимметрия  $A_{fb}$  проявляется только в сильных переходах, тогда в нашем способе регистрации ожидаемая величина  $A_{fb}$  будет (3-5)%. Такая величина асимметрии  $A_{fb}$  уже сравнима с величиной ложной асимметрии возникающей за счет  $(n, \gamma)$ -реакции при взаимодействии рассеянных нейтронов с ядрами образца. На рисунке 6.6 представлен выход гамма квантов реакции  $(n, \gamma)$  после рассеяния нейтронов на ядрах Nb (сплошная кривая). Видно, что даже для образца Nb толщиной всего 0,2 мм вклад реакции  $(n, \gamma)$  после рассеяния нейтронов составляет почти 2%.

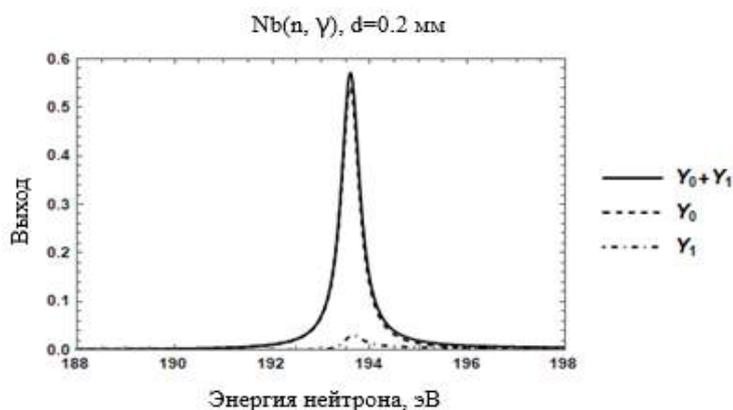


Рисунок 6.6 – Выход  $\gamma$ -квантов реакции  $(n, \gamma)$  (----), выход гамма квантов реакции  $(n, \gamma)$  после рассеяния нейтронов на ядрах Nb (.....), суммарный выход  $\gamma$ -квантов (сплошная кривая)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2024 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

**1. Задача «Развитие и применение транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций».**

План работ на 2024 год выполнен полностью.

Задача выполнена с использованием программных комплексов MCNPX, SHIELD и инженерных расчетов. Продемонстрирована возможность создания долгоживущей бериллиевой мишени для компактных импульсных источников тепловых нейтронов с низким фоном промежуточных, быстрых нейтронов и гамма-квантов. Результаты использованы при разработке проектно-конструкторской документации прототипа вращающейся мишени с горизонтальной осью вращения.

Получены новые данные в исследованиях нуклонной и гиперядерной материи. С использованием расчета начального взаимодействия адронов с помощью UrQMD и DCM динамических подходов впервые получено удовлетворительное описание экспериментальных данных в столкновениях тяжелых ионов. Результаты расчетов используются при подготовке экспериментов на установке NICA в ОИЯИ (Дубна).

**2. Задача «Исследования по физике деления и нейтрон-ядерных взаимодействий».**

План работ на 2024 год выполнен полностью.

Получены значимые научные результаты. Подготовлена версия пакета программ для реконструкции сечений радиационного захвата нейтронов ядром. Проведен один сеанс установки ИНЕС с образцами золота  $^{197}\text{Au}$  и тантала  $^{181}\text{Ta}$  на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС центра коллективного пользования (ЦКП) ИЯИ РАН. Измерена зависимость в спектре нейтронов пучка от энергии. Определена функция разрешения TOF спектрометра, которая хорошо описывает форму резонансов. Разработана процедура определения зависимости фона от времени.

**3. Задача «Развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред».**

План работ на 2024 год выполнен полностью.

Разработана программа для накопления данных на времяпролетном нейтронном спектре, позволяющая улучшить параметры экспериментальной электроники, в частности, улучшить временное разрешение и количество каналов для подключения детекторов.

Разработка программы модуля микроконтроллера для управления и настройки предусилителей по интерфейсу SPI позволила организовать управление порогами предусилителей детекторной системы и улучшить соотношение сигнал/шум за счет возможности более точной настройки.

Проведено исследование одномерного позиционно-чувствительного сцинтилляционного детектора с двумя кремниевыми фотоумножителями. Получена оценка разрешения подобного типа детекторов (5-10 мм). Данные детекторы обладают простой конструкцией, невысокой ценой, и средним разрешением. За счет использования подобной конструкции детекторов возможно определение текстуры образца без существенного удорожания детекторной системы.

Предложенная методика, разработанный счетчик и схема предварительной обработки сигналов от позиционно чувствительного сцинтилляционного счетчика большой длины для тепловых нейтронов позволит делать двухкоординатные детекторы большого размера. В них один счетчик позволяет мерить сразу две координаты взаимодействия теплового нейтрона с детектором. Одна координата – позиционное положение счетчика в детекторе, а вторая – точка взаимодействия нейтрона в самом счетчике. В больших проволочных камерах существует проблема провисания проволочек, пробоев высокого напряжения. Здесь же нет высокого напряжения (33В) и проблемы провисания проволочек.

Оснащение нейтронографических установок линейными и двухкоординатным позиционно-чувствительным детектором нейтронов (ПЧД) существенно расширяет их возможности, в частности, в дифракции позволяет обнаружить текстуру образца. Использование математической обработки массива данных ПЧД позволяет в различных вариантах представлять данные и варьировать соотношение интенсивности пиков и разрешения. Также есть возможность интегрирования в широкой полосе углов с поправкой ко времени пролета, что позволяет получать высокую интенсивность одновременно с высоким разрешением, так же, как и в детекторах с временной фокусировкой. Причем в данной работе детектор стоял под углами  $2\theta = 44-62^\circ$ , тогда как детекторы с временной фокусировкой располагаются, как правило, под углами  $> 90^\circ$ . Благодаря этому методу нам удалось в условиях данного эксперимента достигнуть увеличения интенсивности в 1,45 раза с более узким (на 18%) пиком.

Была протестирована система измерения давления в камерах на основе эффекта зависимости положения линий фотолюминесценции рубина от давления, предназначенная для нейтронографических экспериментов.

Результаты выполненных работ позволили войти в число соисполнителей Миннауки и высшего образования по проекту «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа», соглашение №075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. с ежегодным (2023-2024гг) финансированием 9 (девять) млн руб. Также по результатам НИР в 2024г Д.Н. Труновым была защищена диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н., а Д.А. Бучным готовится к защите в диссертационном Совете ИЯИ РАН диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. по специальности «Приборы и методы физического эксперимента».

#### **4. Задача «Исследование структуры перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях)».**

План работ на 2024 год выполнен полностью.

При высоких давлениях и низких температурах методами рентгеновской дифракции, комбинационного рассеяния света и магнитной восприимчивости исследовалось влияние сжатия решетки на кристаллическую структуру сверхпроводника  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2$  с близким к оптимальному легированному и передопированному составу, а также температура сверхпроводящего перехода ( $T_C$ ) и фононные моды. Было установлено, что степень легирования не влияет на структуру, однако, как и давление, сильно влияет на электронные свойства и  $T_C$ . Обнаружены оптимальные величины давления с максимальным  $T_C$  в диапазоне 9-16 ГПа, в зависимости от степени легирования. Также обнаружены аномалии на барическом поведении фононных спектров в диапазоне 10-20 ГПа, которые указывают на возможное перераспределение заряда под давлением в слоях  $\text{BiO}$  [33].

Используя методы комбинационного рассеяния света, рентгеновской дифракции и магнитной восприимчивости в антиферромагнитном  $\text{Bi}_{2.1}\text{Sr}_{1.9}\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  при одинаковых условиях, была изучена эволюция двухмагнетонного спектра рамановского рассеяния и структурных параметров при высоком давлении до  $P \sim 30$  ГПа. Была установлена связь между давлением, параметром решетки в плоскости ( $d$ ) и сверхобменным взаимодействием ( $J$ ) в виде  $J \sim d^{-(6.6 \pm 0.2)}$ . Обнаружена явная корреляция поведения магнитных возбуждений и величины  $T_C$  в допированном сверхпроводящем варианте данной структуры при росте давления [34].

Разработана программа для проведения измерений высокого сопротивления при криогенных температурах, позволяющая проводить измерения различных диэлектриков при температурах от 5 К – 350 К. Разработана программа для управления UV лазером для

вырезания элементов камер высоких давлений, позволяющая производить сборки камер с алмазной наковальней для давлений до 200 GPa.

С помощью программы Quantum Espresso на основе DFT теории, из первых принципов предсказано существование нерегулярной сети одномерных дефектов графена, определено влияние таких дефектов на теплоемкость при высоких температурах, сделана оценка температуры плавления графена.

Методами рентгеновской дифракции охарактеризованы образцы термостойких волокон SiC, содержащие атомы Ta и Zr, полученные на основе металлокарбосиланов.

Методом малоуглового рассеяния тепловых нейтронов (МУРН) на установке «Горизонт» ИЯИ РАН исследована структура немагнитных жаропрочных сплавов на основе Ni, и Ti. Данные сплавы представляют интерес как материал для изготовления нейтронографических устройств для исследований в магнитных полях.

Определена зависимость периода магнитной спирали от давления и получено его уменьшение. Таким образом, при низких температурах и под давлением происходит «сжатие» простой магнитной спирали (SS) образца шпинели  $^{114}\text{Cd}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Cr}_2\text{Se}_4$ .

**5. Задача «Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, с целью улучшения и оптимизации параметров установок».**

План работ на 2024 год выполнен полностью.

Работа направлена на совершенствование обработки экспериментальных данных, получаемых на спектрометре по времени замедления в свинце СВЗ-100 ИЯИ РАН, в частности проанализированных и рассмотренных в обзорах [42, 43].

Задача выполнена с использованием программного комплекса, использующего функции отклика (Ф.О.) спектрометра. Получены спектры веществ со значительно лучшим энергетическим разрешением. Значения энергий уровней захвата нейтронов определены с лучшей точностью. С улучшением разрешения спектров нейтронных реакций возможно определение изотопного состава изучаемого микрообразца (см. рисунок 5.3).

Использованы программные комплексы MCNPX, SHIELD и инженерных расчетов для оценок совершенствования нейтронных источников. Установлены дополнительные приборы контроля состояния первого радиоактивного контура охлаждения, обеспечивающие контроль проводимости воды, скорости коррозии материалов и визуализацию процессов нейтронного комплекса ИЯИ РАН. Продемонстрирована возможность создания долгоживущей бериллиевой мишени для компактных импульсных источников тепловых нейтронов с низким фоном промежуточных, быстрых нейтронов и

гамма-квантов. Результаты использованы при разработке проектно-конструкторской документации прототипа вращающейся мишени с горизонтальной осью вращения.

**6. Задача «Развитие новых методов исследования фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов».**

План работ на 2024 год выполнен полностью.

Создан прототип установки для исследования низколежащих р-волновых нейтронных резонансов:

- 10 сцинтилляционных детекторов с монокристаллами BGO,
- система регистрации сигналов на основе оцифровщика ЦРС-32, работающего с тактовой частотой 200 МГц,
- вакуумированный нейтроновод,
- защита вакуумированного нейтроновода.

Определены параметры нейтронного пучка, плотность потока нейтронов и функция разрешения на 3-ем и 4-ом каналах источника резонансных нейтронов ИРЕН.

Разработана, в первом приближении, методика измерения и обработки времяпролетных и амплитудных спектров гамма квантов.

Создана методика описания формы изолированного резонанса с учетом рассеяния нейтронов и с учетом функции разрешения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Васильев И.А., Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В. Исследование формы сигналов в He3 счетчике при регистрации нейтронов // Приборы и техника эксперимента. – 2020. – №2. – С. 13 – 20.
- 2 Васильев И.А., Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В. Гамма-детектор установки ИНЕС для измерения нейтронных сечений. // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 1. – С. 56–65.
- 3 Ской В.Р., Шарапов Э. И. Р-четные угловые корреляции в резонансных (n,  $\gamma$ )-реакциях // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1991. – Т.22, Вып. 6. – С. 1408–1431.
- 4 Angular Distribution of gamma-rays from Neutron-Induced Compound States of  $^{140}\text{La}$  / T.Okudaira [et al.] // Phys. Rev. C. – 2018. – V. 97, No 034622. – P. 15.
- 5 Measurement of the angular distribution of  $\gamma$ -rays after neutron capture by  $^{139}\text{La}$  for a T-violation search / T.Okudaira [et al.] // EPJ Web Conf. – 2019. – V. 219/ – P. 09001.
- 6 Measurement of the angular distribution of prompt gamma-rays emitted in the  $^{117}\text{Sn}(n, \gamma)$  reaction for a T-violation search / J.Koga [et al.] // EPJ Web Conf. – 2019. – V. 219. – P. 09004.
- 7 Spin dependence in the p-wave resonance of  $^{139}\text{La} + n$  / T.Okudaira [et al.] // arXiv:2309.08905v1 [nucl-ex] 16 Sep 2023.
- 8 Target-Moderator-Reflector system for 10–30 MeV proton accelerator-driven compact thermal neutron source: Conceptual design and neutronic characterization / B. Jeon [et al.] // Nuclear Engineering and Technology. – 2020. – V. 52. №. 3. – P. 633 – 646. – <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.08.019>.
- 9 Inada T., Kawachi K., Hiramoto T. Neutrons from Thick Target Beryllium ( $d,n$ ) Reactions at 1.0 MeV to 3.0 MeV // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1968. –V. 5, №. 1. – P. 22 – 29. – <https://doi.org/10.1080/18811248.1968.9732391>.
- 10 Dementyev A.V., Sobolevsky N.M. SHIELD - universal Monte Carlo hadron transport code: scope and applications / Radiation Measurements. – 1999. – Vol. 30. – P. 553 – 557. – [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(99\)00231-0](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(99)00231-0).
- 11 Сидоркин С.Ф., Коптелов Э.А. Импульсный источник нейтронов ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2013. – № 6. – С. 97 –112.
- 12 Buyukcizmeci N., Lebed Y. B., Botvina A. S. Dynamical and statistical simulations for the production of nuclei and hypernuclei at high energy ion Collisions // Physics of Particles

and Nuclei Letters. – 2024. – Vol.21, №5. – P. 983 – 986. – <https://doi.org/10.1134/S1547477124701516>.

13 Botvina A. Statistical mechanism of nucleation in rapidly expanding nuclear matter / 3rd International Workshop on Nuclear Theory (INTW2024), "Nuclei and hypernuclei in relativistic ion collisions": Invited talk / Kemer (Antalya), Turkey (September 29 - October 5, 2024). – URL: <https://intw2024.selcuk.edu.tr/index.php/participants>.

14 Botvina A. Nucleosynthesis of exotic nuclei and hypernuclei in expanding nuclear matter after relativistic collisions / 14th MPD meeting: Invited talk // Dubna, Russia, (16 October, 2024). – URL: <https://indico.jinr.ru/event/4806/timetable/#all.detailed>.

15 MCNP, Monte Carlo N-Particle code. <https://mcnp.lanl.gov>

16  $^{197}\text{Au}$  ( $n,\gamma$ ) cross section in the resonance region / C. Massimi [et al.] // Physical Review C. – 2010. – Vol. 81. – P. 044616. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.81.044616>.

17 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683564 Российская Федерация. Программа для накопления данных на времяпролетном нейтронном спектре (Sphere\_Detector\_Counter): № 2024682924: Заявл. 02.10.2024: Оpubл. 14.10.2024 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

18 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024684342 Российская Федерация. Программа модуля микроконтроллера для управления и настройки предусилителей по интерфейсу SPI (CAN Amp Control): № 2024682941: Заявл. 02.10.2024: Оpubл. 16.10.2024 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

19 Development of a linear position-sensitive scintillation neutron detector based on ZnS(Ag): 6Li and silicon photomultipliers / D. N. Trunov [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2024. – Vol. 18, No. 4. – P. 881-886. – <https://doi.org/10.1134/S1027451024700599>.

20 Электроника для детекторов тепловых нейтронов на основе сцинтилятора ZnS(Ag)/LiF / В.Н.Марин [et al.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2024 – № 8 – С. 20–26.

Англ.: Read-out system for thermal neutron detectors based on ZnS(Ag)/LiF scintillator / V. N. Marin [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2024. – Vol. 18, No. 4. – P. 894-899. – <https://doi.org/10.1134/S1027451024700617>

21 Аппаратура для внешнего воздействия на образец: камеры высокого давления, магниты и криостаты / В.С. Литвин [и др.] // Международный форум «Исследования с

применением синхротронного излучения, нейтронов и электронов» (Курчатов ФСНЭ-2024) / г. Москва, Россия, (21-23 октября 2024г.). – М., 2024. – С. 190. – URL: [https://api.kcsni-service.ru/media/static/thesis\\_2024.pdf](https://api.kcsni-service.ru/media/static/thesis_2024.pdf).

22 Многофункциональный дифрактометр СФЕРА / Д.Н. Трунов [ и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 1 (139). – С. 1-8. – <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.29>.

23 Моделирование нейтронного дифрактометра СФЕРА с твердотельными счетчиками нейтронов на основе ZnS(Ag)/6LiF / Д.А. Бучный [и др.] // IV Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред»: Тезисы докладов / г. Дубна, (11–15 ноября 2024 г.). – URL: – <https://indico.uni-dubna.ru/event/22/>. – С. 3 - 4.

24 Fujiwara N., Uwatoko Y., Matsumoto T. A NiCrAl pressure cell up to 4,6 GPa and its application to cuprate and pnictide superconductors // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 500. – P. 032008. – <https://doi.org/10.1088/1742-6596/500/3/032008>.

25 Верещагин Л.Ф., Александров Б.С. Электрический манометр для высоких давлений // ЖТФ. – 1939. – №9. – С. 843-846.

26 Ruby-fluorescence-measurement-for-high-pressure. – URL: <https://almax-asylab.com/resource/ruby-fluorescence-measurement-for-high-pressure/> (Дата обращения 15.09.2023).

27 Clamp cell with in situ pressure monitoring for low-temperature neutron scattering measurements / Podlesnyak A. [et al.]. // High Pressure Research. – 2018. – Vol. 38. – P. 482 – 492. – <https://doi.org/10.1080/08957959.2018.1519560>.

28 Исследование жаропрочных объемных композитов MoTiC и MoTiC-W / Трунов Д.Н. [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – №10 (136). – <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.2>.

29 Двухкоординатный детектор нейтронов для дифрактометра с фокусировкой по времени пролета. / Литвин В.С. [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – №7(145). – <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.36>.

30 Нейтронные малоугловые спектрометры на импульсном источнике ИН-06 ИЯИ РАН / В.С. Литвин [и др.] // Международный форум «Исследования с применением синхротронного излучения, нейтронов и электронов» (Курчатов ФСНЭ-2024) / г. Москва, Россия, (21-23 октября 2024г.). – М., 2024. – С. 189. – URL: [https://api.kcsni-service.ru/media/static/thesis\\_2024.pdf](https://api.kcsni-service.ru/media/static/thesis_2024.pdf).

31 Применение газовых двухкоординатных детекторов нейтронов для

исследования структуры немагнитных сплавов методом малоуглового рассеяния и дифракции нейтронов / В.С. Литвин [и др.] // Труды 66-ой Всероссийской научной конференции МФТИ / г. Москва, (1 – 6 апреля 2024). – URL:

[https://old.mipt.ru/upload/medialibrary/56d/7.-inbikst\\_2024-\\_1\\_.pdf](https://old.mipt.ru/upload/medialibrary/56d/7.-inbikst_2024-_1_.pdf). – С. 83.

32 Р.А. Садыков, В.П. Глазков, Г.Г. Шабунина. Период магнитной спирали в шпинели  $^{114}\text{Cd}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Cr}_2\text{Se}_4$  под давлением // Международный форум «Исследования с применением синхротронного излучения, нейтронов и электронов» (Курчатов ФСНЭ-2024) / г. Москва, Россия, (21-23 октября 2024г.). – М., 2024. – С. 96. – URL: [https://api.kcsni-service.ru/media/static/thesis\\_2024.pdf](https://api.kcsni-service.ru/media/static/thesis_2024.pdf).

33 Structural and phonon anomalies in the superconducting  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  with varying doping level at high / Jie Xin [et al.] // EPL. – 2024. – V. 146, № 5. – P. 56001. – <https://doi.org/10.1209/0295-5075/ad44d3>.

34 Lattice Effect on the superexchange interaction in antiferromagnetic  $\text{Bi}_{2,1}\text{Sr}_{1,9}\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  / Jie Xin [et al.] // J. Phys. Chem. C. – 2024. – Vol. 128, No. 1. – P. 7223. – <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c08244>.

35 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683524 Российская Федерация. Программа для проведения измерений высокого сопротивления при криогенных температурах (HighR measure): № 2024682902 : Заявл. 02.10.2024: Оpubл. 14.10.2024 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

36 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683566 Российская Федерация. Программа для изготовления и подготовки элементов для камеры высокого давления с алмазной наковальней (Diamond Cell Prepare): № 2024682927: Заявл. 02.10.2024: Оpubл. 14.10.2024 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

37 Kondrin M. V., Lebed Y. B., Brazhkin V. V. Extended defects in graphene and their contribution to the excess specific heat at high temperatures // Phys. Rev. Lett. – 2021. – Vol. 126. – P. 165501.

38 Kondrin M., Lebed Y. B., Brazhkin V. Intrinsic planar defects in germanium and their contribution to the excess specific heat at high temperatures // Phys. Status Solidi (b). – 2022. – Vol. 259. – P. 2100463.

- 39 Savvatimskiy A., Onufriev S., Kondratyev A. Capabilities of pulse current heating to study the properties of graphite at elevated pressures and at high temperatures (up to 5000 K) // Carbon. – 2016. – Vol.98. – P. 534.
- 40 Kondrin M. V., Lebed Y. B. and Brazhkin V. V. Irregular network of extended defects in graphene and a new criterion of the crystal lattice melting // Diamond and Related Materials. – 2024. – Vol.146. – P. 111150. – <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111150>.
- 41 Предкерамические металлокарбосиланы: синтез, свойства, термотрансформация / Г.И. Щербакова [и др.] // Известия Академии наук. Серия Химическая. – 2024. – т.73, № 2. – стр. 421-436. – УДК 546.281+261.
- 42 Коптелов Э.А. Спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце I: данные сечений  $^{241}, ^{242m}, ^{243}\text{Am}(n,f)$  при энергии до 100 кэВ // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 2024. – №4. – С. 98-112.  
<https://doi.org/10.31857/S1028096024040135>.
- 43 Коптелов Э.А. Спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце II: данные сечений  $^{243-248}\text{Cm}(n,f)$  при энергии до 100 кэВ // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 2024. – № 6. – С. 99–112.  
<https://doi.org/10.31857/S1028096024060146>.
- 44 Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М: Наука, 1979. – 284 с.
- 45 Фридман В.М. Метод последовательных приближений для интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода // УМН. – 1956.– Т.11, №1.
- 46 База оценённых данных JENDL-4.0. –  
URL:<https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/j40.html> (Page generated: 2016/02/20, 06:40:22).
- 47 Илиева К.Д., Казарновский М.В. Нестационарный перенос нейтронов (теория и приложение). – София: Издательство болгарской академии наук, 1984. – 136с.
- 48 Шорин В.С. Компьютерная модель спектрометра нейтронов по времени замедления в свинце // ВАНТ. Сер. Ядерные константы. – 2008. – Вып. 1-2. – С.60 – 86.
- 49 Semenov A.A., Woo C.H. Void nucleation at elevated temperatures under cascade-damage irradiation // Phys. Rev. B. – 2002. – Vol. 66. – P. 024118-1 - 024118-10.
- 50 Sikka V.K., Moteff J. Damage in neutron-irradiated molybdenum (I). Characterization of as-irradiated microstructure // J. Nucl. Mater. – 1974. – Vol. 54. – P. 325.
- 51 Evans J.H. Void swelling and irradiation-induced void shrinkage in neutron irradiated molybdenum and TZM // J. Nucl. Mater. – 1980. – Vol. 88. – P. 31.

52 The Development of Setup for a Study of p-Even Correlations in p-Wave Resonances/ Ergashov A. [et al.] // ISINN-29. – 2023. – P. 224 – 227.

53 Нейтронные резонансы брома / Д. Зелигер [и др.] // ЖЭТФ. – 1963 – Т. 45, Вып. 5. – С. 1294-1303.

54 Evaluation of a Mistaken Asymmetry in the Projected Experimental Search of Spatial Anisotropy of Gammas from  $^{109}\text{Ag}(n,\gamma)$  Reaction at Neutron Energies near 32-eV p-Wave Resonance / Kuznetsov V.L. [ et al.] // ISINN-29. – 2023. – P. 173-178.

55 Forward-backward asymmetry effect in the slow neutrons capture by Silver nucleus / Sedyshev P. V. [et al.] // ISINN-29. – 2023. – P. 198-203.

56 Chrien R.E., Bhat M. R., Cole G. W. Channel spin components of p-wave neutron widths in niobium // Phys. Rev. C. – 1973. –Vol.8, N1. – P. 336.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Список публикаций исполнителей отчета за 2024 г.

A.1 Статьи в журналах из «Белого списка» на 2023 (протокол заседания Межведомственной рабочей группы по формированию и актуализации «Белого списка» научных журналов № ДС/17-пр от 15.05.2023 г.)

1. Buyukcizmeci N., Lebed Y. B., Botvina A. S. Dynamical and statistical simulations for the production of nuclei and hypernuclei at high energy ion Collisions // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. – 2024. – Vol.21, №5. – P. 983 – 986. – <https://doi.org/10.1134/S1547477124701516>.

2. Акулиничев С.В., Гаврилов Ю.К., Джилкибаев Р.М. Позиционно-чувствительный черенковский монитор протонного пучка // *Приборы и техника эксперимента*. – 2024. – № 5 – С.1–10. – URL: <https://iet.ras.ru/2024/5/pub/akulinichev.pdf>.

3. Электроника для детекторов тепловых нейтронов на основе сцинтилятора ZnS(Ag)/LiF / В.Н. Марин [и др.] // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2024 – № 8. – С. 20–26. – <https://doi.org/10.31857/S1028096024080038>.

4. Kondrin M. V., Lebed Y. B. and Brazhkin V. V. Irregular network of extended defects in graphene and a new criterion of the crystal lattice melting // *Diamond and Related Materials*. – 2024. – Vol.146. – P. 111150. – <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111150>.

5. Предкерамические металлокарбосиланы: синтез, свойства, термотрансформация / Г.И. Щербакова [и др.] // *Известия Академии наук. Серия Химическая*. – 2024. – т.73, № 2. – стр. 421 - 436. – УДК 546.281+261.

6. Коптелов Э.А. Спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце I: данные сечений  $^{241, 242m, 243}\text{Am}(n,f)$  при энергии до 100 кэВ // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* – 2024. – №4. – С. 98-112. <https://doi.org/10.31857/S1028096024040135>

7. Коптелов Э.А. Спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце II: данные сечений  $^{243-248}\text{Cm}(n,f)$  при энергии до 100 кэВ // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* – 2024. – № 6. – С. 99–112. <https://doi.org/10.31857/S1028096024060146>.

A.2 Публикации, индексируемые Web of Science и Scopus

1. Development of a linear position-sensitive scintillation neutron detector based on ZnS(Ag): 6Li and silicon photomultipliers / D. N. Trunov [et al.] // *Journal of Surface*

Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2024. – Vol. 18, No. 4. – P. 881-886. – <https://doi.org/10.1134/S1027451024700599>.

2. Structural and phonon anomalies in the superconducting  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  with varying doping level at high / Jie Xin [et al.] // EPL. – 2024. – V. 146, № 5. – P. 56001. – <https://doi.org/10.1209/0295-5075/ad44d3>.

3. Lattice effect on the superexchange interaction in antiferromagnetic  $\text{Bi}_{2.1}\text{Sr}_{1.9}\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  / Jie Xin [et al.] // J. Phys. Chem. C. – 2024. – Vol. 128, No. 1. – P. 7223. – <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c08244>.

4. Semenov A.A., Koptelov E.A. Stochastic fluctuations of 1-D interstitial fluxes under cascade damage irradiation // AIP Conf. Proc. – 2024. – Vol. 3118, Issue 1. – P. 020013-1 – 10. – <https://doi.org/10.1063/5.0222407>.

### A.3 Статьи в журналах из списка ВАК

1. Двухкоординатный детектор нейтронов для дифрактометра с фокусировкой по времени пролета. / Литвин В.С. [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – №7(145). – <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.36>.

2. Исследование влияния типа световода на параметры светосбора в сцинтилляционных детекторах нейтронов, используемых для дифракционных экспериментов / Д.Н. Трунов [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – №11 (149). – <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.130>

3. Многофункциональный дифрактометр СФЕРА / Д.Н. Трунов [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 1 (139). – С. 1-8. – <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.29>.

A.4 Статьи в журналах и сборниках, материалы конференций, главы в книгах, индексируемые РИНЦ

1. Botvina A. Statistical mechanism of nucleation in rapidly expanding nuclear matter / 3rd International Workshop on Nuclear Theory (INTW2024), "Nuclei and hypernuclei in relativistic ion collisions": Invited talk / Kemer (Antalya), Turkey (September 29 - October 5, 2024). – URL: <https://intw2024.selcuk.edu.tr/index.php/participants>.

2. Botvina A. Nucleosynthesis of exotic nuclei and hypernuclei in expanding nuclear matter after relativistic collisions / 14th MPD meeting: Invited talk // Dubna, Russia, (16 October, 2024). – URL: <https://indico.jinr.ru/event/4806/timetable/#all.detailed>.

3. Djilkibaev R.M., Khlustin D.V. Measurements of TOF histogram in high-energy part of neutron spectrum // 30th International Seminar on Interactions of Neutrons with Nuclei /

Sharm El Sheikh, Egypt, (April 14-18, 2024). – Proceedings of ISINN-30. – JINR, Dubna, 2024. – P. 78 – 88. – URL: [isinn.jinr.ru/proceedings/isinn-30.html](https://isinn.jinr.ru/proceedings/isinn-30.html).

4. Evolution of the neutron spectrum during propagation of the neutron flux in solid bodies / N.M. Sobolevsky [et al.] // Nucleus-2024 / Dubna, Russia, (2024). – [https://indico.jinr.ru/event/4304/contributions/27132/attachments/19447/34420/Khliustin\\_INR\\_Nucleus2024\\_pdf.pdf](https://indico.jinr.ru/event/4304/contributions/27132/attachments/19447/34420/Khliustin_INR_Nucleus2024_pdf.pdf).

5. Моделирование нейтронного дифрактометра СФЕРА с твердотельными счетчиками нейтронов на основе ZnS(Ag)/6LiF / Д.А. Бучный [и др.] // IV Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред»: Тезисы докладов / г. Дубна, (11–15 ноября 2024 г.). – URL: – <https://indico.uni-dubna.ru/event/22/>. – С. 3 – 4.

6. Садыков Р.А., Глазков В.П., Шабунина Г.Г. Период магнитной спирали в шпинели  $^{114}\text{Cd}_0,3\text{Zn}_0,7\text{Cr}_2\text{Se}_4$  под давлением // Международный форум «Исследования с применением синхротронного излучения, нейтронов и электронов» (Курчатов ФСНЭ-2024) / г. Москва, Россия, (21-23 октября 2024г.). – М., 2024. – С. 96. – URL: [https://api.kcsni-service.ru/media/static/thesis\\_2024.pdf](https://api.kcsni-service.ru/media/static/thesis_2024.pdf).

7. Нейтронные малоугловые спектрометры на импульсном источнике ИН-06 ИЯИ РАН / В.С. Литвин [и др.] // Международный форум «Исследования с применением синхротронного излучения, нейтронов и электронов» (Курчатов ФСНЭ-2024) / г. Москва, Россия, (21-23 октября 2024г.). – М., 2024. – С. 189. – URL: [https://api.kcsni-service.ru/media/static/thesis\\_2024.pdf](https://api.kcsni-service.ru/media/static/thesis_2024.pdf).

8. Аппаратура для внешнего воздействия на образец: камеры высокого давления, магниты и криостаты / В.С. Литвин [и др.] // Международный форум «Исследования с применением синхротронного излучения, нейтронов и электронов» (Курчатов ФСНЭ-2024) / г. Москва, Россия, (21-23 октября 2024г.). – М., 2024. – С. 190. – URL: [https://api.kcsni-service.ru/media/static/thesis\\_2024.pdf](https://api.kcsni-service.ru/media/static/thesis_2024.pdf).

9. Применение газовых двухкоординатных детекторов нейтронов для исследования структуры немагнитных сплавов методом малоуглового рассеяния и дифракции нейтронов / В.С. Литвин [и др.] // Труды 66-ой Всероссийской научной конференции МФТИ / г. Москва, (1 – 6 апреля 2024). – URL:

10. [https://old.mipt.ru/upload/medialibrary/56d/7.-inbikst\\_2024-\\_1\\_.pdf](https://old.mipt.ru/upload/medialibrary/56d/7.-inbikst_2024-_1_.pdf). – С. 83.

11. Monte-Carlo evaluations of low-energy neutron radiative capture in  $^{93}\text{Nb}$  targets and  $\gamma$ -quanta forward-backward asymmetry caused by geometry and kinematics / V. Kuznetsov [et al.] // 30th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei / Sharm El Sheikh,

Egypt, (April 14-18, 2024). – Proceedings of ISINN-30. – JINR, Dubna, 2024. – P. 33-39. – URL: [isinn.jinr.ru/proceedings/isinn-30.html](http://isinn.jinr.ru/proceedings/isinn-30.html).

12. Angular correlation analysis in the neutrons capture by  $^{109}\text{Ag}(n,\gamma)$  nucleus / V. Kuznetsov [et al.] // 30th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei / Sharm El Sheikh, Egypt, (April 14-18, 2024). – Proceedings of ISINN-30. – JINR, Dubna, 2024. – P. 40-46. – URL: [isinn.jinr.ru/proceedings/isinn-30.html](http://isinn.jinr.ru/proceedings/isinn-30.html).

13. Investigation of Low-Energy p-Wave Resonances in  $^{93}\text{Nb}(n,\gamma)$  Reaction at the IREN Facility, JINR / A. Yergashov [et al.] // to be published in Letters to PEPAN in January 2025.

14. Сидоркин С.Ф. Принципы построения нейтронно-генерирующей сборки для компактного нейтронного генератора // Курчатовский форум «Исследования с применением синхротронного излучения, нейтронов и электронов» (Курчатов ФСНЭ-2024) – VI молодежная конференция «Проект DARIA: Компактные источники нейтронов в России» / г. Москва, Россия, (23 октября 2024г.). – URL: [www.iter.ru/daria2024/](http://www.iter.ru/daria2024/).

15. Сидоркин С.Ф. Мишенная сборка импульсного источника нейтронов ИН-06 ИЯИ РАН. // VII школа «Нейтронные исследования конденсированного состояния» - НИКОНС-2024 / СПбГУ, г. Петергоф, Россия, (21–22 ноября 2024 г.). – URL: [Программа \(pnpri.spb.ru\)](http://pnpri.spb.ru).

A.5 Патенты на изобретения и полезные модели, свидетельства о регистрации программ, баз данных, иные РИД, имеющие официальную регистрацию

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683564 Российская Федерация. Программа для накопления данных на времяпролетном нейтронном спектре (Sphere\_Detector\_Counter): № 2024682924: Заявл. 02.10.2024: Опубл. 14.10.2024 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683524 Российская Федерация. Программа для проведения измерений высокого сопротивления при криогенных температурах (HighR measure): № 2024682902 : Заявл. 02.10.2024: Опубл. 14.10.2024 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683566 Российская Федерация. Программа для изготовления и подготовки элементов для камеры высокого давления с алмазной наковальней (Diamond Cell Prepare): №

2024682927: Заявл. 02.10.2024: Оpubл. 14.10.2024 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024684342 Российская Федерация. Программа модуля микроконтроллера для управления и настройки предусилителей по интерфейсу SPI (CAN Amp Control): № 2024682941: Заявл. 02.10.2024: Оpubл. 16.10.2024 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

5. Заявка на изобретение № 2023135237/07(077032). Узел мишени компактного источника нейтронов / С. Ф. Сидоркин, П.А. Прокопович, Е.И. Фатьянов, А.Ю. Гойхман.